



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

CINVESTAV UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO.

**INTEGRACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SENSOR DE
PRESIÓN CON TECNOLOGÍA CMOS-MEMS.**

Tesis que presenta

Ing. Jeovani Tavira Fuentes

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

En la especialidad de Ingeniería Eléctrica

Director de Tesis: Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca.

Ciudad de México, México.

A mis padres J. Rosas Tavira y Maribel Fuentes por su amor, sus sabios consejos, por ser para mí un ejemplo de vida y por todo su apoyo que me han brindado hasta este momento y así poder concluir este logro tan importante en mi formación profesional. Solo me resta decirles GRACIAS.

A cada uno de mis hermanos por ser para mí una inspiración, de igual manera gracias por todo su apoyo y por su ejemplo de superación.

Agradecimientos.

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Por lo cual expreso mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas:

Al Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca gracias por su muy valiosa guía, apoyo, orientación y seguimiento brindado en el desarrollo de este trabajo. Le agradezco su tiempo y su disposición que me dedicó.

Agradezco a mis sinodales Dr. José Antonio Moreno Cadenas y al Dr. Felipe Gómez Castañeda por sus comentarios, sugerencias y el tiempo dedicado a la revisión.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada en mi estancia en la Maestría.

Por último, agradezco a CINVESTAV por permitirme realizar mis estudios de Maestría.

Contenido.

Agradecimientos	iii
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
OBJETIVO	xiii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Leyes de Escalamiento.....	5
1.2 Diferentes tipos de medición de presión y dispositivos empleados.....	9
1.3 Tecnologías CMOS-MEMS empleadas.....	15
1.3.1 Fotolitografía.....	17
1.3.2 Micromaquinado de Volumen.....	18
1.3.3 Micromaquinado de Superficie.....	21
Capítulo 2 Consideraciones Teóricas	24
2.2 Alternativas de transducción para el sensado de presión.....	24
2.2.1 Detección Piezorresistiva.....	25
2.2.2 Detección Capacitiva.....	33
2.3 Uso del Transistor FGMOS como transductor.....	35
2.4 Geometrías comunes de las membranas.....	39
2.4.1 Modelo de pequeña deflexión.....	40
2.4.2 Modelo de grande deflexión.....	44
2.4.3 Deflexión de placa circular con bordes fijos.....	45
2.4.4 Deflexión de placa rectangular con bordes fijos.....	46
2.4.5 Deflexión de placa cuadrangular con bordes fijos.....	48
2.5 Elección de la tecnología CMOS.....	49

2.6 Diseño de la estructura MEMS.....	51
2.7 Conclusiones.....	56
Capítulo 3 Diseño del Sistema.....	57
3.1 Introducción.....	57
3.2 Diseño geométrico del sensor.....	57
3.2.1 Separación entre electrodos.....	58
3.2.2 Rango de presión del sensor.....	61
3.2.3 Capacitancia máxima.....	63
3.3 Acoplamiento de la membrana con el FGMOS.....	65
3.4. Estructura del sensor de presión.....	72
3.5 Conclusiones.....	73
Capítulo 4 Simulaciones.....	74
4.1 Introducción.....	74
4.2 Análisis de desplazamiento y capacitancia por elemento finito con COMSOL.....	75
4.2.1 Membrana cuadrada con sus cuatro lados anclados.....	75
4.2.2 Membrana cuadrada sostenida por cuatro brazos.....	79
4.3 Respuesta del Prototipo del Sensor de Presión.....	90
4.4 Circuito de Lectura.....	93
4.5 Conclusiones.....	97
Capítulo 5 Diseño Topológico.....	98
5.1 Introducción.....	98
5.2 Diseño de la estructura mecánica.....	98
5.3 Diseño del transistor NMOS.....	102
5.4 Conclusiones.....	109

Capítulo 6 Conclusiones.....	110
6.1 Trabajo Futuro.....	112
Referencias.....	113
Apéndices.....	115
Apéndice A: Modelo para la simulación del transistor FGMOS.	115
Apéndice B: Modelos para transistores NMOS y PMOS.	118
Apéndice C: Archivo modificado para la extracción de capacitancias "mamis05.ext".....	121
Apéndice D: Extracción de capacitancias.....	125
Apéndice E: Netlist para el circuito de lectura.....	126

ÍNDICE DE TABLAS.

<i>Tabla 1. 1.- Leyes de escalamiento más comunes.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 1. 2.- Conversión de unidades para la Presión.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. 1.- Valores del módulo del Young del Silicio.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2. 2.- Coeficientes Piezoresistivos para la orientación (100).</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. 3.- Coeficientes Piezoresistivos de Silicio P para diferentes orientaciones.</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. 4.- Factor de Gauge para algunos materiales.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2. 5.- Parámetros α y β en función de las dimensiones de la membrana.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2. 6.- Comparación de esfuerzo y deflexión entre las diferentes geometrías de membrana.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3. 1.- Parámetros proporcionados por la tecnología de 0.5 μm, doble poly, doble metal, pozo N.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3. 2.- Valores de desplazamiento para diferentes longitudes de membrana.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3. 3.- Valores de capacitancia para diferentes longitudes de membrana.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 3. 4.- Parámetros de desplazamiento y capacitancia para la membrana con una longitud de 200 μm por lado.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4. 1.- Parámetros empleados en el diseño del sensor.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 4. 2.- Comparación de los parámetros de desplazamiento, capacitancia y presión para los cuatro modelos propuestos.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 4. 3.- Parámetros de capacitancia para el modelo seleccionado.</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 4. 4.- Valores obtenidos para todos los prototipos.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4. 5.- Valores del circuito de lectura para todas las propuestas.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 4. 6.- Voltajes de salida en función de la corriente de entrada.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 5. 1.- Comparación de capacitancia en reposo.....</i>	<i>106</i>

ÍNDICE DE FIGURAS.

<i>Figura 1. 1.- (a) Vista superior de un sensor piezoresistivo con cuatro piezoresistencias integradas en la membrana. (b) Configuración puente de Wheatstone empleada en los sensores piezoresistivos.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1. 2.- (a) Esquema de un sensor de presión capacitivo. (b) Configuración puente de Wheatstone adaptado para la medición de capacitancia.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1. 3.- Escalamiento de una resistencia.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1. 4.- Escalamiento de una capacitancia.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1. 5.- Escalamiento de un inductor.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1. 6.- Sensor de presión resistivo.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1. 7.- Galas Extensiométricas.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1. 8.- Sensor de Presión piezo-cerámicos/multicapa.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1. 9.- Sensor de Presión con semiconductores.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1. 10.- Sensor de Presión capacitivo.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1. 11.- Sensor de Presión absoluta.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1. 12.- Sensor de Presión diferencial.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1. 13.- Sensor de Presión manométrica.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1. 14.- Proceso Fotolitográfico.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1. 15.- Micromaquinado de volumen húmedo: a) ataque isotrópico; b) ataque anisotrópico.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1. 16.- Grabado seco.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 1. 17.- Micromaquinado de superficie.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1. 18.- Unión por fusión de un vidrio con una oblea de silicio mediante una interfaz de SiO₂.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.1.-Configuración puente de Wheatstone.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.2.- Orientación de Piezoresistencias.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.3.- Configuración de Piezoresistores para dos tipos membranas.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.4.- Chip con Transducción Capacitiva.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.5.- Transistor de compuerta flotante con N entradas.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.6.- Corte Transversal de un Transistor FGMOS.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.7.- Circuito Equivalente del FGMOS.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.8.- Deflexión de una membrana circular.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.9.- Membrana Circular.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.10.- Membrana Rectangular.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.11.- Membrana Cuadrada.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.12.- Tecnología CMOS.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2.13.- Capas de la Tecnología Mosis On Semiconductor (0.5µm).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.14.- Capas que conforman la membrana del sensor.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 2.15.- Separación (d) entre las placas del capacitor</i>	<i>52</i>
<i>Figura 2.16.- Estructura del sensor con brazos.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 2.17.- Ventanas por las cuales entra el agente decapante.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2.18.- Mascara que evita que el decapante elimine las paredes externas al sensor.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 2.19.- Vista en 3D de la estructura final.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.1.- Gráfico del desplazamiento vs presión para diferentes longitudes de membrana.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.2.- Gráfico de la variación de capacitancia vs presión para diferentes longitudes de membrana.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.3.- Circuito eléctrico equivalente del sensor de presión.</i>	<i>66</i>

Figura 3.4.- Gráfico de I_{DS} vs V_{CG} empleando los valores de capacitancia (C_{var}) mostrados en la Tabla 3.4. ...	67
Figura 3.5.- Gráfico de V_{FG} vs V_{CG} empleando valores de capacitancia (C_{var}) mostrados en la Tabla 3.4.	68
Figura 3.6.- I_{DS} del FGMOS vs presión aplicada con diferentes voltajes aplicados a la compuerta de control.	69
Figura 3.7.- Característica I-V de un FGMOS con capacitancia variable (coeficiente de acoplamiento variable).	70
Figura 3.8.- Característica I-V de un FGMOS considerando una inyección de carga negativa en su compuerta flotante.	71
Figura 3.9.- Sección transversal del sensor de presión.	72
Figura 4. 1.- Integración de capacitancia para la membrana.	75
Figura 4. 2.- Diseño de la primera estructura simulada.	75
Figura 4. 3.- Comportamiento del desplazamiento en el área de la membrana al aplicarse una presión de 60kPa.	76
Figura 4. 4.- Deformación que sufre la membrana con la presión aplicada.	77
Figura 4. 5.- Comportamiento del desplazamiento en función de la presión aplicada.	78
Figura 4. 6.- Comportamiento de capacitancia en función de la presión aplicada.	79
Figura 4. 7.- Modelo propuesto con brazos para soportar a la membrana.	80
Figura 4. 8.- Forma y longitudes de los brazos.	81
Figura 4. 9.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $30\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.	81
Figura 4. 10.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de $30\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.	82
Figura 4. 11.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $40\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$.	83
Figura 4. 12.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de $40\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$.	84
Figura 4. 13.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $50\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$.	85
Figura 4. 14.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de $50\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$.	86
Figura 4. 15.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.	87
Figura 4. 16.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.	88
Figura 4. 17.- Comportamiento de la corriente I_{DS} en función del voltaje de compuerta V_{CG} .	91
Figura 4. 18.- Comportamiento del voltaje de compuerta flotante V_{FG} en función del voltaje de compuerta de control V_{CG} .	92
Figura 4. 19.- Configuración espejo de corriente para la lectura de la presión.	93
Figura 4. 20.- Corriente de salida del espejo de corriente.	94
Figura 4. 21.- Corriente I_{DS} para diferentes V_{CG} aplicado.	94
Figura 4. 22.- Convertidor corriente-voltaje.	95
Figura 4. 23.- Gráfico Voltaje de salida vs Presión aplicada.	97
Figura 5. 1.- Diseño topológico del sensor de presión.	99
Figura 5. 2.- Mascarilla para evitar que el decapante elimine el poly1 en esta región.	100
Figura 5. 3.- Sección transversal del sensor de presión.	101
Figura 5. 4.- Transistor N para la lectura de la señal de salida.	102
Figura 5. 5.- Espejo de corriente.	103
Figura 5. 6.- Amplificador operacional en configuración de convertidor corriente-voltaje.	104
Figura 5. 7.- Diseño topológico del convertidor corriente-voltaje.	105
Figura 5. 8.- Diseño topológico completo.	105
Figura 5. 9.- Pozo N en el substrato.	107
Figura 5. 10.- Crecimiento de la capa de Poly1.	107
Figura 5. 11.- Crecimiento de óxido de silicio y del poly2 y definición de la capa estructural.	107

<i>Figura 5. 12.- Crecimiento de las capas estructurales del sensor.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5. 13.- Mascarilla en el marco.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5. 14.- Estructura final.....</i>	<i>109</i>

RESUMEN.

Esta Tesis trata sobre el diseño de un sensor de presión empleando el transistor de compuerta flotante (FGMOS) como una novedosa alternativa de transducción, además el diseño se basa en la tecnología Mosis On Semiconductor (0.5 μ m, pozo N, doble polisilicio, doble metal) para la elaboración de la parte mecánica del sensor.

El capacitor variable se creará a partir de la unión de las capas de poly2, metal1 y metal2 formando un electrodo, mientras que el otro electrodo será el substrato del sensor. El valor de la capacitancia variable depende de la distancia de separación que existe entre los electrodos, esta distancia disminuye conforme la presión aplicada a la membrana se incrementa. Este cambio de capacitancia se verá reflejado en el voltaje de compuerta flotante, el cual generará una variación de corriente a la salida que será proporcional a la presión aplicada.

Además de la propuesta novedosa de traducción, se presenta el diseño del sensor de presión con una estructura igualmente novedosa en el área de los sensores de presión, debido a que nunca antes ha sido reportada, la cual consiste en colocar cuatro brazos en cada una de las esquinas de la membrana cuadrada. Se elaboró un estudio de diferentes dimensiones para los brazos, así como el análisis eléctrico del FGMOS.

Finalmente se elabora el diseño topológico del sensor con la finalidad de que el diseño pueda ser fabricado respetando las reglas de diseño.

ABSTRACT.

This thesis deals with the design of a pressure sensor using the floating gate transistor (FGMOS) as a novel transduction technique, also the design is based on the MOSIS On Semiconductor technology (0.5 μ m, well N, double polysilicon, double metal) for making the mechanical part of the sensor.

The variable capacitor is to be created from the junction of the layers of poly2, metal1 and metal2 forming an electrode whereas the other electrode is the substrate of the sensor. The value of the variable capacitance depends on the separation between the electrodes, this distance decreases as the pressure applied to the membrane increases. This capacitance change will be reflected in the floating gate voltage, which will generate a variation of the output current proportional to the applied pressure.

The design of the pressure sensor has a novel structure in the field of pressure sensors, because it has never been reported, which involves placing four arms in each of the corners of the square membrane. They conducted a study of different dimensions for the arms, and an electrical analysis of the FGMOS.

Finally, the topological design of the sensor is presented with the objective that the design can be fabricated according the design rules of the silicon foundry selected.

OBJETIVO.

Objetivo general.

- Realizar el diseño de un sensor de presión con un buen rango de presión para posteriormente poder ser elaborado en la tecnología CMOS-MEMS.

Objetivos específicos.

- Emplear el transistor de compuerta flotante FGMOS como nuevo método de transducción.
- Realizar el circuito de lectura del sensor de presión.
- Realizar la integración de la estructura mecánica del sensor con el circuito de lectura en el mismo chip.

Introducción.

En Europa, se les llama "Microsistemas", en los Estados Unidos y en otros lugares, cada vez más, se les llama "Sistemas Micro-Electro-Mecánicos", o "MEMS". Aunque el nombre europeo es más general y en muchos aspectos más descriptivo, las siglas MEMS se está afianzando en todo el mundo.

"Microsistemas", literalmente "son sistemas muy pequeños" o "sistemas constituidos por componentes muy pequeños." Esto lo hace algo interesante y útil ya que actualmente se encuentran diversas aplicaciones que emplean este tipo de dispositivos, con la ventaja adicional de tener un costo reducido. "Los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)", por otro lado, tienen una ubicación: *Micro* establece una escala dimensional, *Electro* sugiere electricidad o electrónica (o ambos), y *Mecánicos* sugiere las piezas móviles de algún tipo. Pero además, el concepto de MEMS ha crecido hasta abarcar muchos otros tipos de cosas pequeñas, incluidos los dispositivos térmicos, magnéticos, fluidos, óptica y sistemas, con o sin partes móviles.

La mayoría de los dispositivos MEMS y sistemas implican algún tipo de fotolitografía basada en la microfabricación, tomado de la industria de la *microelectrónica* y además mejorado con técnicas especializadas generalmente llamados "micromaquinado." La fabricación por lotes, que es característico de la industria de la microelectrónica, ofrece el potencial de reducción de costos en la fabricación en alto volumen. El substrato que preferentemente se utiliza es el silicio cristalino debido a que ha demostrado ser un material sorprendentemente bueno para construir pequeños sensores, incluso cuando no hay componentes electrónicos en el dispositivo (como es el caso de la tecnología PolyMUMPS), debido a que las herramientas e instrumentos necesarios para la microfabricación se han diseñado para que coincida con las características de las obleas de silicio.

En esta tesis se presenta el campo de los MEMS aplicado hacia el diseño de un sensor de presión empleando como transductor un transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS). Es importante mencionar que actualmente los sensores de presión que constituyen el mayor segmento del mercado de los dispositivos MEMS.

Respecto a la aplicación de estos sensores, cabe resaltar que la medición de la presión es una parte clave de muchos sistemas, tanto comerciales como industriales, destacando su aplicación en la industria automotriz. Puesto que la presión es un esfuerzo normal (fuerza por unidad de área), se podría imaginar la detección de presión directamente mediante el uso de un material piezoeléctrico que puede traducir la presión normal en voltaje. La mayoría de estos sensores funcionan bajo el principio de la deformación mecánica y el estrés sobre un diafragma de muy poco espesor, la cual es inducida por la presión a medir. Esta deformación o el estrés son convertidos a señal eléctrica a través de diferentes medios de transducción.

En este sentido, se puede decir que los sensores de presión se pueden dividir en sensores de presión absoluta o sensores de presión relativa. Los primeros se configuran con una cavidad que es evacuada por uno de los lados de la membrana, es decir, se mide la presión con referencia al vacío. Por el otro lado, en el sensor de presión relativa no existe ninguna cavidad aislada, sino que su referencia es la presión del medio ambiente.

Desde el punto de vista de transducción, son diferentes las alternativas que se tienen para lograr la transducción de la presión. A continuación se explican brevemente los diferentes métodos que se pueden encontrar tanto en la literatura como en dispositivos comerciales.

a) *Sensores de presión empleando piezoresistencias.* Estos sensores integran sobre la membrana cuatro piezoresistencias, como se observa en la figura 1.1a, que se encargan de convertir el estrés inducido sobre ellas por la presión, en un cambio de resistencia, a través de las cuales se convierte en voltaje mediante un puente de Wheatstone, como se muestra en la figura 1.1b.[1]

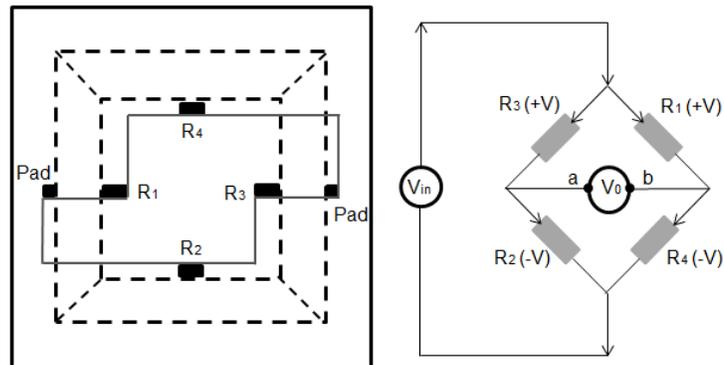


Figura 1. 1.- (a) Vista superior de un sensor piezoresistivo con cuatro piezoresistencias integradas en la membrana. (b) Configuración puente de Wheatstone empleada en los sensores piezoresistivos.

El voltaje de salida de este circuito se obtiene a partir de la ecuación 1.0.

$$V_0 = V_{in} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \quad (1.0)$$

Este tipo de sensores tienen una alta ganancia y una relación lineal entre el estrés y el cambio de resistencia. Sin embargo, el principal problema que tiene es su alta sensibilidad a la temperatura.

b) *Sensores de presión empleando variación de capacitancia.* La configuración de este tipo de sensores se basa en la formación de un capacitor, donde uno de los electrodos lo forma la membrana y el otro electrodo lo forma el sustrato, como se puede ver en la figura 1.2a. Al aplicar una presión sobre la membrana, existirá una deformación que reducirá la separación de los electrodos, por lo que se reflejará

en un cambio de capacitancia. Este método tiene la ventaja de ser relativamente independiente a la temperatura de operación. Este método es comúnmente empleado en este tipo de sensores y la variación de capacitancia se puede medir también mediante un Puente de Wheatstone, como el que se muestra en la figura 1.2b (figura 2.10 del libro MEMS and Microsystems). [1]

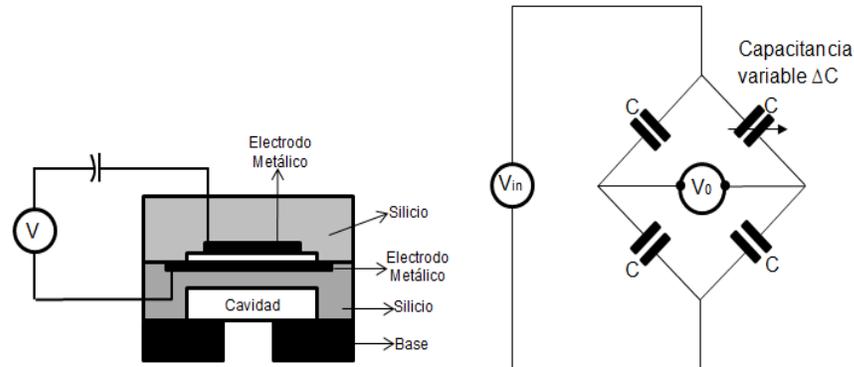


Figura 1. 2.- (a) Esquema de un sensor de presión capacitivo. (b) Configuración puente de Wheatstone adaptado para la medición de capacitancia.

La relación entre el voltaje de salida del puente y la variación de capacitancia se expresa en la ecuación 1.2.

$$V_0 = \frac{\Delta C}{2(2C + \Delta C)} V_{in} \quad (1.2)$$

Esta relación entrega una salida de voltaje que no es lineal en función de la variación de capacitancia, lo cual puede representar una desventaja.

Siguiendo la tendencia que se ha estado desarrollando en los últimos años respecto a la fabricación de los MEMS y que entre otras cosas ayuda a reducir los costos de producción, se tiene que los sensores de presión integrados combinan en el mismo sustrato a un transductor sensible a la presión con un circuito de procesamiento de señales. En este trabajo de tesis, se diseña un sensor de presión con la intención de integrar una membrana capacitiva, empleando a un

transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS) cuya corriente estará en función de la variación del coeficiente de acoplamiento característico de este dispositivo. Por lo tanto, el diseño será monolítico ya que se pretende que tanto el sensor como la electrónica se encuentren en el mismo sustrato. La tecnología CMOS en la que se basa este diseño, es bajo las reglas de diseño de ON Semiconductor de $0.5 \mu\text{m}$, *pozo N, doble polisilicio, doble metal*, que se puede mandar a fabricar a través de MOSIS (MOS Implementation System). Esto representa un método novedoso de transducción para este tipo de sensores, ya que no ha sido reportado con anterioridad y que extiende la aplicación del FGMOS, que ha sido ampliamente estudiado pero al que no se le ha dado una aplicación como la que se desarrolló en este trabajo. Además, también se pretende que la liberación de la membrana se haga mediante un post-proceso de micromaquinado, siguiendo los procedimientos de lo que se ha llamado una tecnología CMOS-MEMS, la cual es una derivación tecnológica que enlaza los pasos de fabricación de circuitos integrados CMOS, con los procedimientos de micromaquinado de los MEMS, para la creación de estructuras 3D, junto con circuitería electrónica.

1.1 Leyes de Escalamiento.

Estas leyes son muy importantes para el diseño de dispositivos a micro escalas, por lo que es necesario tener una comprensión de las leyes de escalamiento. Todas las cantidades de interés físico tienen dimensiones que se pueden expresar en términos de tres magnitudes fundamentales: masa (m), longitud (l) y el tiempo (t). Cuando en un dispositivo o sistema todos los elementos son escalados de una manera similar la integridad de la geometría se mantiene con el tamaño, a este tipo de escala se llama "isomorfo" (o "isométrica"). Por otro lado, si los diferentes elementos del dispositivo o sistema no escalan de una manera similar, la escala se llama "alométrica". Las leyes de escalamiento no sólo son importantes para el diseño de sistemas microdimensionados sino también es

muy útil en la comprensión de los principios físicos básicos que intervienen en muchos fenómenos complejos.

Las leyes de escalamiento son la relación de parámetros de longitud que existe entre dos objetos, por ejemplo, el volumen como longitud cúbica l^3 y el área de una superficie como longitud cuadrada l^2 . Existen dos tipos de reglas de escalamiento, la primera de ellas está relacionado con el tamaño físico del objeto y la segunda está relacionada con la escala de un comportamiento fenomenológico de un objeto/máquina.

En la tabla 1.1 se muestran algunas leyes de escalamiento que siguen los parámetros geométricos que pueden llegar a ser escalados [2].

Parámetro	Fórmula	Escalamiento	Notas
Distancia.	d	l	
Área.	A	l^2	
Velocidad.	V	l^3	
Masa.	$m = \rho V$	l^3	ρ Densidad.
Constante Elástica.	k	l	
Frecuencia de Resonancia.	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	l^{-1}	
Conducción de Calor.	$P = k \frac{A}{d} \Delta T$	l	k Conductancia Térmica.
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho \dot{x} D}{\mu}$	$l \dot{x}$	μ Viscosidad D Dimensión Crítica.

Tabla 1. 1.- Leyes de escalamiento más comunes.

Las leyes de escalamiento abarcan diferentes campos de la ingeniería, a continuación se describen los más empleados en esta rama. [15]

- *Micromecanismos.*- En las escalas microscópicas, mecanismos y máquinas son generalmente de construcción monolítica. Esto es principalmente para facilitar la fabricación. En esa pequeña escala es casi imposible montar las piezas de tamaño micrométrico y desarrollar bisagras o articulaciones prismáticas sin aumentar el costo del dispositivo.
- *Fuerzas Magnéticas.*- La transducción magnética es basada sobre la ley de Lorentz entre movimiento de partículas cargadas, es la transducción electromecánica más común en macro-escala. Desafortunadamente esta transducción requiere colisiones grandes para miniaturizar y fabricar con técnicas de fotolitografía.
- *Escalamiento de Parámetros Eléctricos.*- Los tres elementos eléctricos pasivos, resistencias, condensadores e inductores, son tomado para la determinación de los efectos de escala.
 - *Resistencia.*- La resistencia de un conductor dado de longitud l , área de sección transversal A y resistividad específica ρ está dada por ña ecuación 1.3.

$$R = \frac{L\rho}{A} = [l^1]x[l^2]^{-1} = l^{-1} \quad (1.3)$$

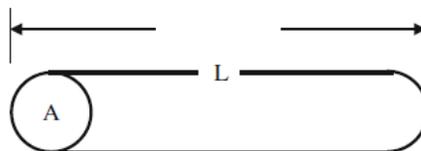


Figura 1. 3.- Escalamiento de una resistencia.

- *Capacitancia.*- Para un capacitor de placas paralelas con área de placa A, separación entre placas d y permitividad ϵ está dada por la ecuación 1.4.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = [l^2] \times [l^1]^{-1} = l^1 \quad (1.4)$$

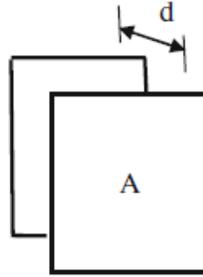


Figura 1. 4.- Escalamiento de una capacitancia.

- *Inductancia.*- Con N como el número de bobinas por unidad de longitud, con un área de bobina A y longitud L del inductor, la inductancia está dada a partir de la ecuación 1.5.

$$\mathcal{L} = \frac{\mu N^2 A}{L} = [l^2] \times [l^1]^{-1} = l^1 \quad (1.5)$$

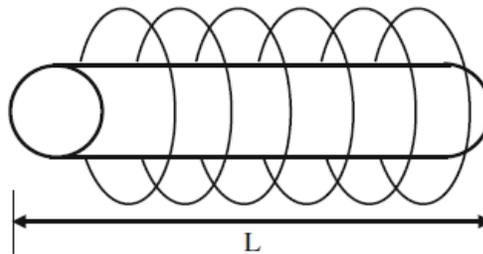


Figura 1. 5.- Escalamiento de un inductor.

- *Fuerzas Electrostáticas (Actuación Capacitiva).*- La transducción capacitiva o electrostática es la más empleada en dispositivos MEMS, se basa entre las fuerzas de cargas positivas o negativas. La principal desventaja que presenta

este tipo de transducción es la relativa facilidad de construcción y el bajo poder de consumo. La fuerza atractiva entre dos placas paralelas con área de placa A, separación d, permitividad ϵ y voltaje V, se obtiene empleando la ecuación 1.6.

$$F = \epsilon \frac{A}{2d^2} V^2 \sim l^0, \quad (V \text{ Constante}) \quad (1.6)$$

Usando la relación $\epsilon = v/d$ entre el voltaje y un campo eléctrico, la ley de escalamientos para la fuerza electrostática con un campo eléctrico constante se obtiene a partir de la ecuación 1.7 [2][14].

$$F = \epsilon \frac{A}{2} \epsilon^2 \sim l^2, \quad (\epsilon \text{ Constante}) \quad (1.7)$$

1.2 Diferentes tipos de medición de presión y dispositivos empleados.

La presión es una de las pocas magnitudes físicas que logran un intervalo de medición que rebasa las 19 décadas, desde 1×10^{-10} [Pa] hasta 2×10^9 [Pa]. La presión es una fuerza que se ejerce sobre un área determinada y se mide en unidades de fuerzas por unidad de área. Esta fuerza se puede aplicar a un punto específico en una superficie o distribuirse sobre ésta, cada vez que se ejerce una presión se produce una deflexión, una distorsión o un cambio de volumen o dimensión.

Las mediciones de presión pueden ser desde valores muy bajos que se consideran un vacío, hasta miles de toneladas por unidad de área.

Para medir la presión se utilizan sensores que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si ésta supera un determinado valor límite. Es importante tener en cuenta la presión que se mide, ya que pueden distinguirse los siguientes tipos:

- *Presión absoluta:* Presión comparada con el valor cero del vacío absoluto ($P_{abs} = 0$).
- *Presión Atmosférica (Presión Barométrica):* Es la Presión ejercida por la atmósfera terrestre. Varía ligeramente con las condiciones meteorológicas y decrece con la altitud. Al nivel del mar la presión atmosférica es de 1.033 [kPa/cm²], 101.3 [kPa], 760 [mm de Hg] ó 1 [atmósfera]. Estos valores se conocen como los de presión atmosférica normal.
- *Presión diferencial:* Presión que representa la diferencia entre dos presiones absolutas ($P_1 - P_2$)
- *Sobrepresión (Presión Relativa, Positiva):* Presión en función de la presión atmosférica, considerándose ésta como valor cero. Los detectores que miden esta presión se llaman sensores de presión relativa.
- *Vacío (Presión Negativa Relativa):* El vacío es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica y la presión absoluta, cuando ésta es menor a la atmosférica. [5][10]

La unidad de medición de la presión más comunes son los pascales, pero existen diferentes unidades para esta medición, como las mostradas en la tabla 1.2.

	Pascal	Bar	N/mm ²	Kp/m ²	Kp/cm ²	Atm	Torr
1Pa(N/m²)	1	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	0.102	0.102x10 ⁻⁴	0.987x10 ⁻⁵	0.0075
1Bar(daN/cm²)	100.000	1	0.1	10200	1.02	0.987	750
1N/mm²	10 ⁶	10	1	1.02x10 ⁵	10.2	9.87	7500
1Kp/m²	9.81	9.81x10 ⁻⁵	9.81x10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	0.968x10 ⁻⁴	0.0736
1Kp/cm²(1At)	98100	0.981	0.0981	10000	1	0.968	736
1Atm(760Torr)	101325	1.103	0.1103	10330	1.033	1	760
1Torr(mmHg)	133	0.00133	1.33x10 ⁻⁴	13.6	0.00132	0.00132	1

Tabla 1. 2.- Conversión de unidades para la Presión.

Anteriormente se explicaron los sensores de presión desde el punto de vista del método de transducción. Por otro lado, desde el punto de vista del tipo de construcción, a continuación se comenta sobre los diferentes tipos de sensores que se pueden encontrar o que han sido reportados, pero que además, son macrométricos, es decir, no se fabrican a partir de la microelectrónica [10].

Sensores de Presión Resistivos: Una presión sobre una membrana hace variar el valor de las resistencias montadas en un puente de Wheatstone. Las Células de Carga y las Galgas Extensiométricas son elementos metálicos que cuando se someten a un esfuerzo sufren una deformación del material, y por lo tanto una variación de su resistencia interna. En la figura 1.6 se muestran sensores de presión de este tipo.

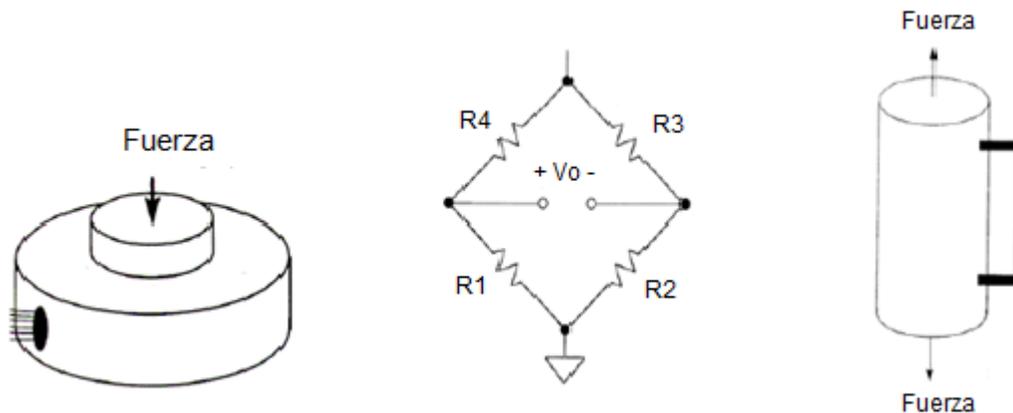


Figura 1. 6.- Sensor de presión resistivo.

Galgas Extensiométricas: Una galga de extensión se construye sobre un metal de coeficiente de elasticidad dado, agregándole ya sea un alambre, una tira semiconductor o pistas conductoras. Al deformarse el soporte de la galga, el sensor se estira o se comprime, variando así su resistencia. El cambio de resistencia será, precisamente, el reflejo de la deformación sufrida. Este tipo de sensores de presión de silicio se utilizan para presiones entre 0 hasta 10 bar, pero los sensores de presión con técnica de películas delgadas y gruesas son

apropiados para cualquier presión. En la figura 1.7 se muestra un sensor que emplea galgas extensiométricas.

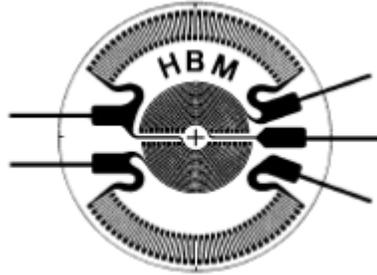


Figura 1. 7.- Galas Extensiométricas.

Sensores de Presión Piezo-Cerámicos/Multicapa: La combinación de la tecnología piezo-cerámica y multicapa se utiliza para producir una señal eléctrica cuando se aplica una fuerza mecánica en el sensor. . Este tipo de sensor, como el mostrado en la figura 1.8, es de dimensiones relativamente grande y no se puede considerar micrométrico.

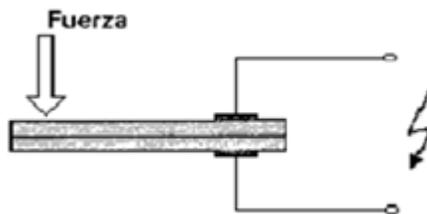


Figura 1. 8.- Sensor de Presión piezo-cerámicos/multicapa.

Sensores de Presión con Semiconductores: Como ya se había explicado, una variación de presión sobre una membrana, hace actuar un único elemento piezoresistivo semiconductor difundido sobre un semiconductor, es decir, en este caso solo se tiene una piezoresistencia, por lo que no emplea un Puente de Wheatstone para la medición de la variación de la resistencia. A pesar de que este

sensor se basa en un semiconductor, tampoco se fabrica en tecnologías CMOS o MEMS. La figura 1.9 muestra un ejemplo de este tipo de sensores.

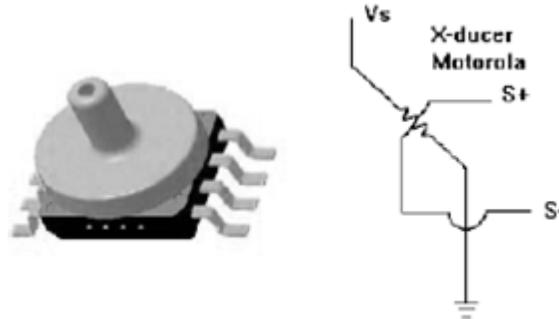


Figura 1. 9.- Sensor de Presión con semiconductores.

Sensor de Presión Capacitivo. Basado en tecnología del silicio, se evalúa el cambio capacitivo de una membrana de cerámica, ocasionado por la flexión en relación con un contra electrodo paralelo en función de una presión aplicada. Ello significa que la membrana es una placa del condensador y una muestra de la forma en que este tipo de sensor es fabricado se muestra en la figura 1.10.

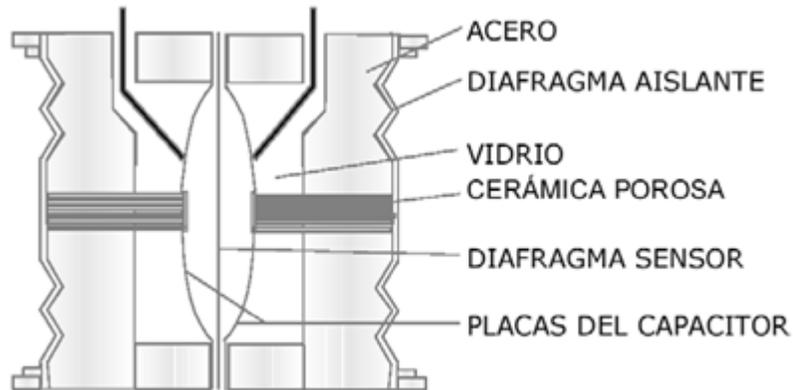


Figura 1. 10.- Sensor de Presión capacitivo.

Como se puede apreciar, los sensores ilustrados con anterioridad son primordialmente macrométricos y son voluminosos. La misma función de sensar presión se puede lograr con dispositivos micrométricos que se basan en

tecnologías CMOS-MEMS, cuyas dimensiones dan la ventaja de tener dispositivos pequeños y que reducen el espacio, de tal manera que se pueden integrar convenientemente en sistemas complejos para realizar diferentes funciones, como por ejemplo, en vehículos automotores para detectar presiones en el aire de las llantas o sistemas hidráulicos.

Otra manera de clasificar de los sensores de presión es mediante el tipo de presión que estos detectan, a continuación se presentan lo más comunes.

Sensores de Presión Absoluta: Miden la diferencia entre la presión externa aplicada a un lado del diafragma, y a una presión de referencia cero (vacío), aplicada al otro lado. Este tipo de sensores se emplean en Barómetros, Detección de fugas, Altimetros, etc. y su configuración se muestra en la figura 1.11.

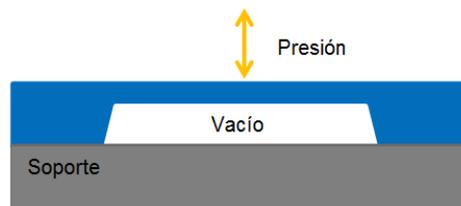


Figura 1. 11.- Sensor de Presión absoluta.

Sensores de Presión Diferencial: Este tipo de sensores están diseñados para aceptar simultáneamente dos fuentes de presión independientes. La salida es proporcional a la diferencia de presión a las dos fuentes, se pueden aplicar en flujo de aire y/o control de filtros de aire. El esquema mostrado en la figura 1.12 muestra la forma como operan.

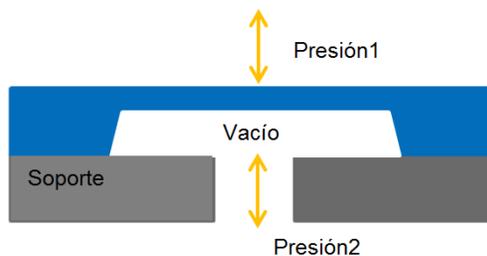


Figura 1. 12.- Sensor de Presión diferencial.

Sensores de Presión Manométrica: Su principio de operación es similar a una medición de presión arterial, es un caso especial de medición de presión diferencial, donde la presión atmosférica se utiliza como referencia, ya que un lado del sensor está abierto a la atmósfera. Este tipo de sensores se aplican en medición de presión sanguínea, nivel de líquidos, presión de ruedas, etc. La figura 1.13 muestra la configuración de este tipo de sensores [10].

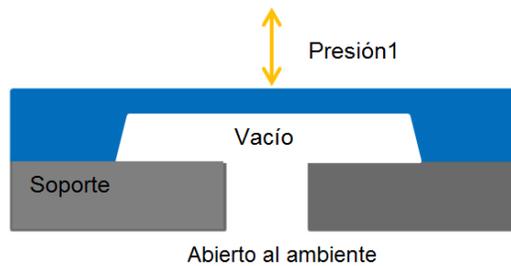


Figura 1. 13.- Sensor de Presión manométrica.

1.3 Tecnologías CMOS-MEMS empleadas.

Como se mostró en la sección anterior, se puede encontrar una diversidad de sensores de presión que son construidos con diferentes tecnologías, pero que no están relacionadas con los procedimientos normalmente basados en la microelectrónica. Sin embargo, gracias a la madurez de esta última tecnología se han podido fabricar sensores MEMS de todos los tipos, que son de dimensiones mucho más pequeñas y que además, pueden llevar la electrónica de procesamiento de señal integrada en el mismo sustrato, como también ya se mencionó. De esta manera, se considera que el surgimiento de la tecnología MEMS no hubiera sido posible sin la madurez alcanzada por la microelectrónica ya que ambas tecnologías coinciden en algunos pasos de su fabricación, pues ambas emplean etapas de fotolitografía, decapado de silicio y crecimiento de películas delgadas como óxido de silicio, nitruro de silicio, polisilicio y metales.

Una breve descripción de algunos de los pasos en común, empleados en la microelectrónica ayudará para enmarcar la fabricación de los MEMS dentro de ese

entorno, con lo cual se pueden identificar en un momento dado, las limitaciones que se pudieran presentar para su diseño y que llegan a establecer ciertos requisitos para su configuración final. Actualmente se tienen tecnologías particulares, como la PolyMUMPS de MEMSCAP entre otras, con las que se pueden fabricar únicamente sensores o actuadores pero que no permiten la integración de elementos electrónicos, pero también existen tecnologías CMOS estándar, como las que ofrece MOSIS, con las cuales se pueden fabricar sistemas inteligentes que pueden contener tanto a los sensores o actuadores, junto con la electrónica. Sin embargo, con esta última se requiere un post-proceso de micromaquinado para liberar la estructura microelectromecánica.

Inicialmente se puede comentar que los semiconductores cristalinos como el silicio (Si), el germano (Ge) y el arseniuro de galio (GaAs) se utilizan como sustrato debido a las características similares que presentan. El silicio en la actualidad es el material más empleado en la industria de la microelectrónica debido a que presenta las siguientes ventajas:

- Es abundante y barato.
- La capacidad de silicio para ser depositado en películas policristalinas o amorfas.
- Es fácil de oxidarlo mediante la exposición a vapor de agua u oxígeno, para formar una capa SiO₂ superficial químicamente inerte y eléctricamente aislante.

La orientación cristalina de silicio es importante en la fabricación de dispositivos MEMS debido a que algunos de los agentes de ataque utilizados atacan el cristal a diferentes velocidades en diferentes direcciones. Estos ataques pueden ser *isotrópicos*, si atacan a la misma velocidad en diferentes orientaciones cristalinas, o *anisotrópicos*, si su ataque es preferencial sobre determinada orientación cristalina. Este último tipo de ataque, es el que normalmente se usa para la realización del micromaquinado volumétrico de los MEMS y existen

diferentes técnicas que se pueden consultar en la literatura, dependiendo del propósito. La primera técnica de ataque es fundamentalmente empleada para el micromaquinado superficial cuando se emplean capas estructurales y capas de sacrificio [3].

1.3.1 Fotolitografía.

La fotolitografía es la técnica para transferir copias de un patrón maestro, que en particular para tecnologías CMOS, normalmente es un diseño de circuitos integrados, que contiene dispositivos activos (diodos y transistores), pasivos (resistencias, capacitores, inductores) y elementos de interconexión (metales).

La figura 1.14 ilustra de manera resumida el proceso de fotolitografía y a continuación se describe el procedimiento. Primero, el sustrato se cubre con una película delgada de un material, por lo general dióxido de silicio (SiO_2), en el caso de obleas de silicio; posteriormente una capa delgada de un polímero orgánico, que es sensible a la radiación ultravioleta, se deposita sobre la capa de óxido, lo que se llama una resina fotosensible. Una fotomáscara, que consiste en una placa de vidrio (transparente) recubierta con un patrón de cromo (opaco), se coloca entonces en contacto con la superficie recubierta de resina fotosensible. En estas condiciones, la oblea se expone a la radiación ultravioleta para transferir el patrón de la máscara a la resina fotosensible. La radiación provoca una reacción química en las áreas expuestas de la resina fotosensible de las cuales hay dos tipos: positivas y negativas. La resina fotosensible positiva se ve reforzada por la radiación UV, mientras que las resinas fotosensibles negativas se debilitan.

En el fotorevelado, la solución de enjuague elimina cualquiera de las áreas expuestas o las zonas no expuestas de resina fotosensible, dejando un patrón de fotoresina grabada sobre la superficie de la oblea. Una solución a base de ácido fluorhídrico (HF) y agua desionizada se utiliza para atacar y eliminar el óxido no cubierto por la resina fotosensible. Posteriormente, la fotoresina restante se

elimina, dejando un patrón de óxido sobre la superficie de silicio. El modelo final de óxido es una copia positiva o negativa del patrón de la fotomáscara y sirve como una máscara en posteriores etapas de procesamiento [3][4].

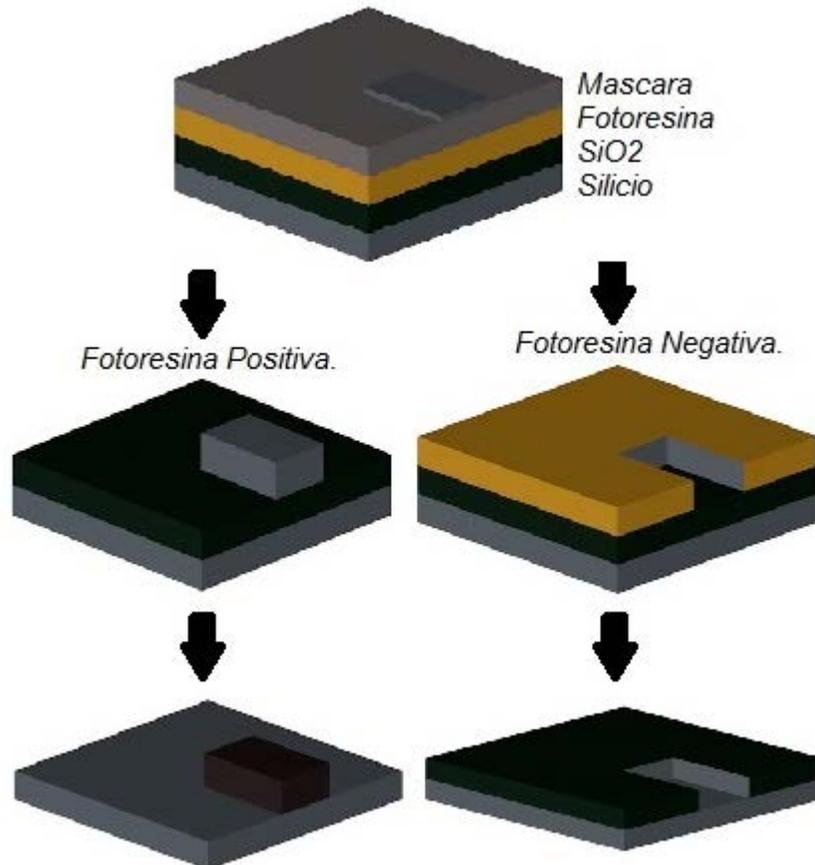


Figura 1. 14.- Proceso Fotolitográfico.

1.3.2 Micromaquinado de Volumen.

Este proceso consiste en la eliminación de una parte del volumen del sustrato con la finalidad de crear estructuras mecánicas libres de contacto, como membranas, estructuras tridimensionales, como cavidades o agujeros que atraviesan la oblea mediante el uso de un proceso que utiliza el grabado anisotrópico en húmedo (Wet Etching) o un método de ataque en seco (Dry Etching), tales como el grabado por iones reactivos (RIE).

Grabado Húmedo (Wet Etching).

El grabado húmedo describe la eliminación de material a través de la inmersión de un material (normalmente una oblea de silicio) en un baño líquido compuesto de un agente de ataque químico. Estos agentes de ataque pueden ser isotrópicos o anisótropicos.

La característica de los agentes de ataque isotrópico que la solución tiene la misma velocidad de ataque en todas las direcciones por lo que llega a tener una magnitud de ataque lateral similar al ataque vertical, como se muestra en la figura 1.15. La solución más común para el grabado isotrópico de silicio es la llamada HNA, que consiste de una mezcla de ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO₃) y ácido acético (CH₃ COOH). Una ventaja de este tipo de ataque es que se pueden usar capas de óxido de silicio (SiO₂) o nitruro de silicio (Si₃N₄) como máscara protectora de aquellas zonas que no se quieren atacar, ya que la velocidad de ataque de la solución HNA es casi nula sobre estas capas. Por otro lado, la característica del ataque anisotrópico es que la razón de ataque del silicio es dependiente de la orientación cristalina del sustrato, es decir, el ataque es mayor sobre una orientación cristalina y muy reducida en otras direcciones, como se muestra en la figura 1.15b. Las soluciones que comúnmente se emplean para este tipo de ataque son el hidróxido de potasio (KOH), el hidróxido de trimetilamonio (TMAH) y el etilene-diamine-pyrocatechol (EDP) y se emplean preferentemente en obleas con orientación (100). Las capas que se emplean como máscaras de protección durante ese ataque también son el SiO₂ y el Si₃N₄.

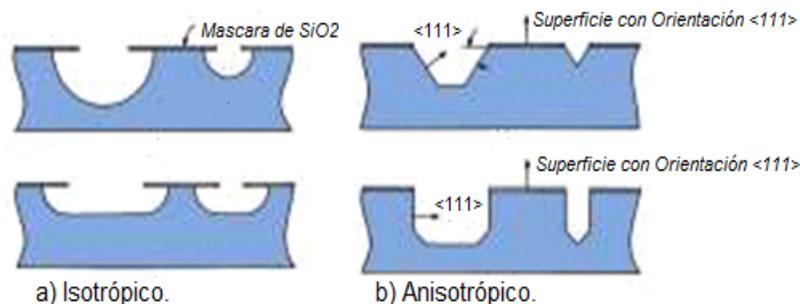


Figura 1. 15.- Micromaquinado de volumen húmedo: a) ataque isotrópico; b) ataque anisotrópico.

Grabado Seco (Dry Etching).

El tipo de micromaquinado volumétrico más común en MEMS es el grabado por iones reactivos (RIE), que utiliza la energía adicional en la forma de radio frecuencia (RF) para provocar la reacción química de los elementos gaseosos empleados en este ataque, en el cual los iones energéticos son acelerados hacia el material para ser grabados, desplazando átomos del substrato para ser liberados y extraerlos del material base. La figura 1.16 muestra la secuencia de este tipo de grabado [3].

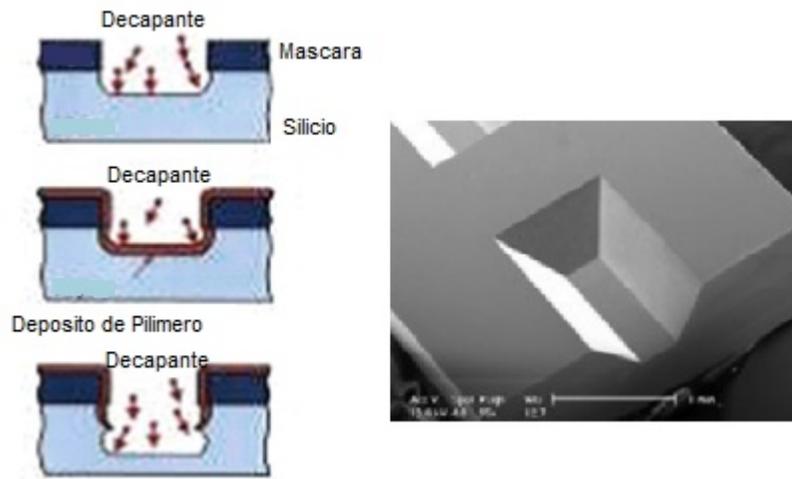


Figura 1. 16.- Grabado seco.

Micromaquinado de volumen presenta la siguiente ventaja:

- Utilizar capas epitaxiales para estructuras micromaquinadas por medio de grabado electroquímico, especialmente si las capas más gruesas (varias micras) son necesarias.

Un buen número de sensores de presión MEMS están basados en el micromaquinado volumétrico, aunque también se han reportado sensores hechos con micromaquinado superficial, cuyo proceso será explicado en la siguiente sección.

Los sensores de presión MEMS de silicio fabricados por micromaquinado de volumen, combinan excelentes propiedades mecánicas de los diafragmas de silicio con elementos que tienen características piezoresistivas o piezoeléctricas y se han fabricado mediante el empleo de dispositivos que se implantan o se difunden en la superficie superior del diafragma. En el caso de los elementos piezoresistivos, su ubicación sobre el diafragma debe ser tal que puedan ser configurados en un arreglo del tipo puente de Wheatstone, sean capaces de aportar un elemento de detección con una señal de voltaje de salida razonablemente fuerte [4].

1.3.3 Micromaquinado de Superficie.

El micromaquinado de superficie involucra el procesamiento de ataque de capas estructurales y de sacrificio por encima del sustrato, principalmente utilizado como capa base sobre el cual construye el dispositivo MEMS. El material estructural y de sacrificio se deposita al sustrato en forma de capas de películas delgadas sobre la superficie del sustrato (típicamente una oblea de silicio). Estas capas actúan como soporte mecánico o actúa como espaciadores. Estas últimas son precisamente las conocidas como capas de sacrificio, ya que sirven para dar soporte inicial a la capa estructural mientras se le da forma, para después ser eliminada mediante un ataque, para liberar al sensor o actuador. La figura 1.17 muestra brevemente los pasos seguidos en un micromaquinado superficial. Por lo tanto el proceso implica generalmente películas de dos materiales diferentes: un material estructural del que está hecho el sensor o el actuador (generalmente de silicio policristalino o polisilicio, nitruro de silicio o aluminio) y un material de sacrificio por lo general óxido [3][4].

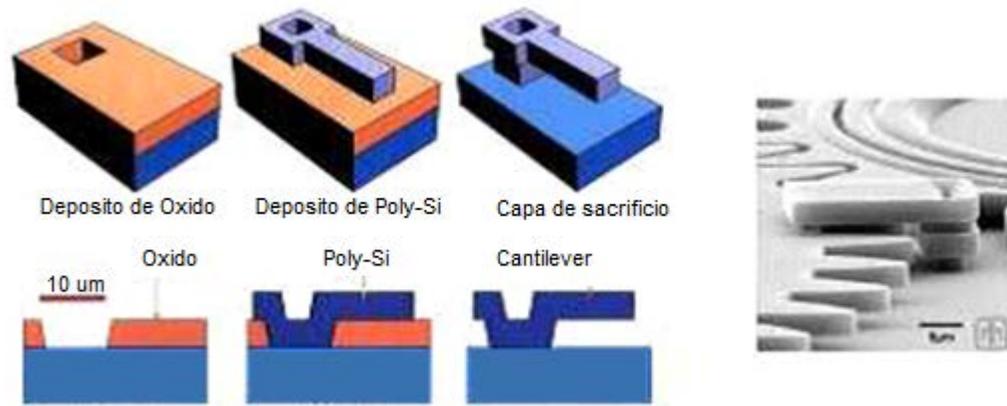


Figura 1. 17.- Micromaquinado de superficie.

Este tipo de micromaquinado ofrece las siguientes ventajas:

- Se pueden emplear las delgadas capas estructurales delgadas para fabricar electrodos de un condensador, que opere como un electrodo sensible a la presión (diafragma) y junto a un electrodo inferior que está fijo al sustrato, con una separación muy pequeña entre sí.
- El grosor de diafragmas delgados puede definirse con precisión y controlados por el depósito de la capa.

Unión por Fusión (Fusion Bonding).

Con el fin de formar estructuras MEMS más complejas y de mayor tamaño, las obleas de silicio se pueden unir a otros materiales en un proceso conocido como unión por fusión. Ésta una técnica que permite la integración prácticamente perfecta de múltiples capas y se basa en la creación de enlaces atómicos entre cada capa (mediante calentamiento y presión en el caso de que un vidrio sea unido a una oblea de silicio), o a través de una película delgada de dióxido de silicio, ver figura 1.18. El material compuesto resultante tiene una tensión residual muy baja debido a la igualación de los coeficientes de expansión térmica de cada capa. Además, la resistencia mecánica de la unión es comparable con la de las

capas adyacentes resultantes en una técnica de fabricación muy fuerte, compuesto de cavidades cerradas y canales [3][4].



Figura 1. 18.- Unión por fusión de un vidrio con una oblea de silicio mediante una interfaz de SiO₂.

Consideraciones Teóricas.

2.1 Introducción.

En este capítulo se presentaran las diferentes opciones de transducción para los sensores de presión, así como sus ventajas y desventajas. Además de las diferentes geométricas empleadas para la membrana del sensor. También se presentara el modelo de un transistor de compuerta flotante FGMOS como una nueva alternativa para método de traducción.

Por último se presentara el prototipo propuesto para el sensor en función de las reglas de diseño que nos proporciona la tecnología CMOS estándar.

2.2 Alternativas de transducción para el sensado de presión.

Un transductor está formado de componentes microelectrónicos los cuales actúan sobre la señal que genera el sensor de manera física, para generar una respuesta en correspondencia con el estímulo, es decir, cambiar una forma de energía en otra; generalmente los transductores ofrecen una señal de salida eléctrica. Para este propósito, existen diferentes métodos que ayudan a correlacionar un fenómeno físico, químico o magnético con una respuesta eléctrica. A continuación se explican algunos de los métodos más usados en los sistemas microelectromecánicos, junto con algunas de sus propiedades características, con la finalidad de elegir el más apropiado para la configuración que se estudia en este trabajo.

2.2.1 Detección Piezorresistiva.

Dentro del campo de los MEMS existe una gran variedad de sensores que utilizan el principio piezorresistivo, tal es el caso de los sensores de presión, el cual consiste en medir el cambio de resistividad de un material debido a una presión aplicada sobre la membrana del sensor. Una manera de lograrlo es integrando cuatro piezoresistores en la membrana flexible del sensor con una configuración llamada Puente de Wheatstone; esta configuración se muestra en la figura 2.1 [3].

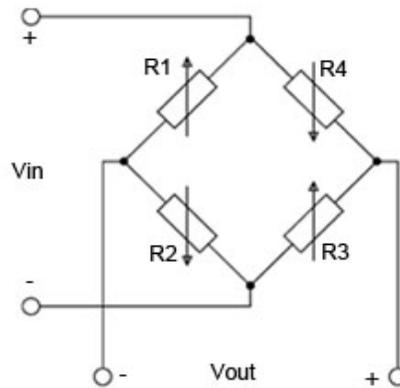


Figura 2.1.-Configuración puente de Wheatstone.

Como se observa en la figura 2.1, un puente de Wheatstone consta de cuatro piezoresistores R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , los cuales, en función del arreglo resistivo, proporcionan el voltaje de salida V_{out} .

$$V_{out} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{in} \quad (2.1)$$

Donde:

V_{in} es el voltaje de entrada.

Los cuatro piezoresistores se difunden en lugares convenientes alrededor de la membrana y la variación de la resistividad estará sujeta a sus respectivos doblamientos y eventuales estiramientos, que se encuentran, a su vez, en función de la presión aplicada P . Así, se puede escribir el cambio de resistencia dependiente de la presión, a partir de la siguiente expresión. ($i = 1, \dots, 4$) [3].

$$R_i(p) = R_i(0) + \Delta R_i(p) = R_i(0) \left[1 + \frac{\Delta R_i(p)}{R_i(0)} \right] = R_i(0)[1 + \rho_i(p)] \quad (2.2)$$

Donde:

$R_i(0)$ valor de resistencia en reposo.

$\Delta R_i(p)$ es el incremento de resistencia al aplicar una presión.

$\rho_i(p)$ razón de cambio de resistencia.

Uno de los criterios más recomendados en cuanto al diseño y colocación de los piezoresistores, es que sus valores pueden ser elegidos de tal manera que el puente sea simétrico, es decir, que el valor de R_1 sea igual a R_3 y el valor de R_2 sea igual a R_4 (ver Figura 2.1) por lo que el voltaje de salida V_{out} se obtiene a partir de la siguiente expresión [3].

$$V_{out} = \frac{R_1^2 - R_2^2}{(R_1 + R_2)^2} V_{in} = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (2.3)$$

Cuando un material es sujeto a un esfuerzo y derivado de éste existe un cambio de resistencia eléctrica, este material tiene una propiedad conocida como efecto piezoresistivo, el cual consiste en el cambio de resistencia a partir del cambio de resistividad del material así como de su forma geométrica; este efecto se obtiene a partir de la ecuación 2.4 [2].

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.4)$$

Donde:

ρ es la resistividad.

A es el área transversal

L es la longitud

Mediante de la derivación de la ecuación 2.4 se obtiene el cambio fraccional de la resistencia como:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta L}{L} \quad (2.5)$$

Donde:

$\Delta \rho$ cambio de la resistividad del material.

ΔA cambio en el área transversal.

ΔL cambio en la longitud.

La ecuación 2.5 muestra el cambio de resistencia debido a los cambios de geometría del material. Por lo tanto el efecto piezoresistivo ocurre en todos los materiales pero es más pronunciado en materiales que tienen un alto cambio piezoresistivo.

El cambio de resistividad debido al esfuerzo es descrito por el *coeficiente piezoresistivo* π definido como el cambio fraccional en resistividad ρ por unidad de estrés. Este coeficiente es descrito en la ecuación número 2.6 [2]:

$$\pi = \frac{\Delta \rho / \rho}{T} = \frac{\Delta \rho / \rho}{ES} \quad (2.6)$$

Donde:

T es el estrés

E es el módulo de Young.

S es la deformación.

El valor del módulo de Young depende de la orientación cristalina del material, en la tabla 2.1 se muestran diferentes valores del módulo de Young para el silicio en diferentes orientaciones, para el caso de nuestro sensor de presión, la membrana se encuentra en la dirección <100>.

Orientación	Módulo de Young [Gpa]
<100>	129.5
<110>	168
<111>	186.5

Tabla 2. 1.- Valores del módulo del Young del Silicio.

Además se sabe que el silicio es un material anisótropico por lo que su coeficiente piezoresistivo depende de la orientación cristalina y dirección de la corriente con respecto al estrés. En algunos casos prácticos se tiene que el esfuerzo se presenta en dirección longitudinal (Estrés longitudinal T_l) y perpendicular (Estrés transversal T_t). En estos casos, el cambio fraccional depende del esfuerzo que se genera en ambas direcciones por lo que el cambio de resistencia se obtiene mediante la ecuación 2.7 [2] [6].

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l T_l + \pi_t T_t \quad (2.7)$$

Por lo anterior, se entiende la importancia que tiene la colocación y orientación que se le debe dar a las piezoresistencias para un funcionamiento óptimo de los sensores de presión. Las dos orientaciones de resistencia que se pueden presentar se ilustran en la figura 2.2. La primera de ellas es la orientación longitudinal, la cual debe extenderse sobre alguna longitud finita a lo largo de la

membrana y por razones de alineación, también se puede extender sobre el soporte o marco de la membrana. Por lo tanto, no todas las partes de la resistencia experimentan la tensión máxima, por lo que resulta en una pérdida de sensibilidad. La siguiente es la orientación transversal que tiene el potencial para entregar la respuesta más grande, ya que, se puede colocar exactamente en el punto correcto y la resistencia experimentará la tensión de flexión máxima. Sin embargo, esta orientación es muy susceptible a las variaciones de fabricación debido a que puede presentar pequeños errores de alineación de fotolitografía [19][6].

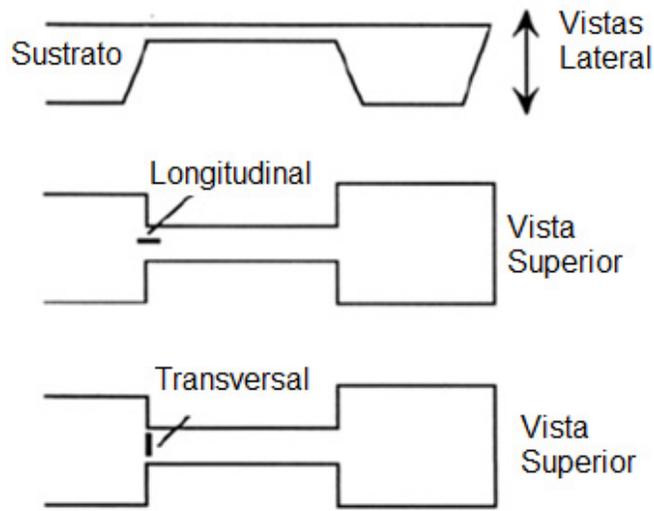


Figura 2.2.- Orientación de Piezoresistencias.

Los requisitos del sistema para establecer sensibilidad, exactitud y precisión, proporcionarán la información necesaria para seleccionar el tipo de orientación adecuada para el sensor a implementar. Debido a las variaciones de fabricación, puede ser necesaria cierta forma de ajuste o calibración para adaptarse a las capacidades del circuito de compensación que se utiliza. Si se emplea una orientación transversal es necesario proporcionar un circuito de compensación con un rango suficiente para anular o reducir las variaciones de fabricación. Por otro lado, una orientación longitudinal, debido a que es más

resistente, permite un circuito de compensación menos robusto, una fabricación menos costosa y procedimiento de calibración [19].

Otras configuraciones típicas combinan dos piezoresistores transversales y dos longitudinales situados en los bordes del diafragma de silicio en la dirección (100) o en la orientación (111); los piezoresistores longitudinales pueden ser colocados cerca de los bordes y/o en el centro. Los diafragmas se pueden diseñar de forma rectangular, cuadrada y/o circular. Más adelante se presentaran las ventajas que tiene cada uno de ellos. En la figura 2.3 se observan dos configuraciones comunes de piezoresistores para una membrana cuadrada y una circular. En la membrana cuadrada se tiene que R1 y R3 estas orientados longitudinalmente mientras que R2 y R4 están orientados de manera tangencial, para la membrana circular todos los piezoresistores están configurados de manera tangencial [3].

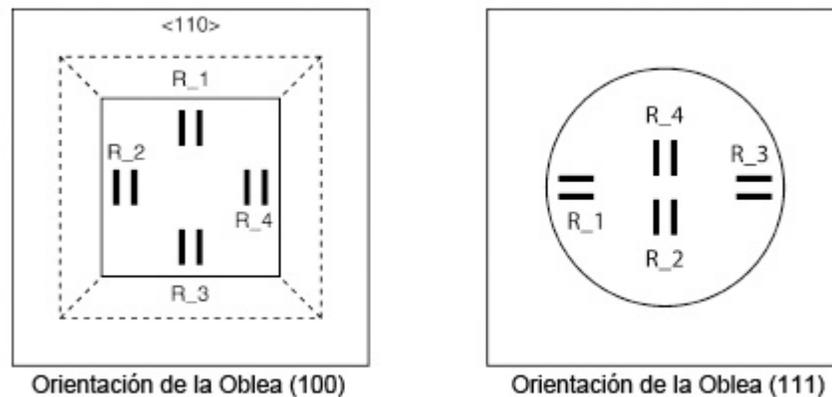


Figura 2.3.- Configuración de Piezoresistores para dos tipos membranas.

Los coeficientes piezoresistivos de un cristal de silicio no son constantes pero están influenciadas por la concentración de dopaje, el tipo de dopado y la temperatura del sustrato. La tabla 2.2 muestra coeficientes piezoresistivos para la orientación (100) a temperatura ambiente y la tabla 2.3 muestra coeficientes piezoresistivos de silicio tipo P en diferentes direcciones cristalinas. Para alta concentración de impurezas el efecto piezoresistivo disminuye [2].

Material	Resistividad [Ωcm]	π_{11}^*	π_{12}^*	π_{44}^*
Silicio P	7.8	+6.6	-1.1	+138.1
Silicio N	11.7	-102.2	+53.4	-13.6

Unidades $10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dinas}$ ó $10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ó Pa^{-1}

Tabla 2. 2.- Coeficientes Piezoresistivos para la orientación (100).

Plano Cristalino	Orientación <x>	Orientación <y>	π_L	π_T
(100)	<111>	<211>	+0.66	-0.33
(100)	<110>	<100>	+0.5	0
(100)	<110>	<110>	+0.5	-0.5
(100)	<100>	<100>	+0.02	+0.22

Tabla 2. 3.- Coeficientes Piezoresistivos de Silicio P para diferentes orientaciones.

Por tanto en silicio tipo p y tipo n el valor del coeficiente piezoresistivo disminuye al aumentar la temperatura y así como las concentraciones de dopaje. Así, el coeficiente piezoresistivo se obtiene en función de la temperatura a partir de la ecuación 2.8 [2].

$$\pi(T) = \pi_{300K} \frac{300K}{T} \quad (2.8)$$

Donde:

π_{300K} Es el coeficiente piezoresistivo a 300° K

T Temperatuta en grados Kelvin.

Otro factor que se utiliza a menudo para la caracterización del efecto piezoresistivo es el *factor Gauge (GF)*, que es el cambio fraccional de resistencia por unidad de tensión, el cual se obtiene mediante la ecuación 2.9 [4] [5].

$$GF = \frac{\Delta R/R}{S} = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2.9)$$

Combinando las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.9) y considerando $\frac{\Delta A/A}{\Delta L/L} = -2\nu$, se obtiene:

$$GF = 1 - \frac{\Delta A/A}{\Delta L/L} + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L} = 1 + 2\nu + E\pi \quad (2.10)$$

Donde:

ν es la razón de Poisson.

$1 + 2\nu$ debido al cambio de geometría.

$E\pi$ debido a las propiedades del material.

El factor de Poisson para casi todos los materiales está entre 0 y 0.5. En la tabla 2.4 se muestran algunos valores del factor de Gauge para algunos materiales. El valor elevado del factor Gauge que tiene el silicio cristalino y silicio policristalino lo hace atractivo para sensores piezoresistivos.

Material	Factor de Gauge GF.
Al	1.4
Cu	2.1
Ni	-12.62
Pt	2.60
Si (SC)	-102 a 135
Si (Poly)	-30 a 40

Tabla 2. 4.- Factor de Gauge para algunos materiales.

Los sensores de presión que se basan en los principios y conceptos anteriormente expuestos, son construidos mediante un micromaquinado volumétrico como el explicado en la sección 1.2.2, con el que se obtiene un diafragma muy delgado, sobre el cual se difunden los piezoresistores. Un problema que presenta este tipo de sensores, es su sensibilidad a la temperatura, por lo que se requieren de circuitos que compensen la variación en función de la temperatura.

2.2.2 Detección Capacitiva.

Otra alternativa que se tiene para los sensores de presión es la detección capacitiva, que es una de la más importantes y ampliamente utilizada. Los mecanismos de detección incluyen una o más placas conductoras fijas con una o más placas conductoras en movimiento, de tal forma que se tiene una capacitancia variable en función de la presión ejercida sobre el diafragma. La detección capacitiva se basa en la ecuación de un condensador de placas paralelas la cual se muestra en la ecuación 2.11.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.11)$$

Donde:

ϵ_0 Permitividad del aire ($8.85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$)

ϵ_r Permitividad del material entre placas

A Area de la placa

d Separación entre placas

Como la capacitancia es inversamente proporcional a la distancia entre las placas, la detección de desplazamientos muy pequeños es extremadamente precisa.

Como se mencionó anteriormente, el transductor capacitivo contiene una placa móvil, lo cual significa que la detección de la capacitancia es una medida de la presión aplicada sobre ésta, debido a que la separación que existe entre las placas va disminuyendo conforme la presión aplicada aumenta. Una ventaja de este método es que el sensor de presión capacitivo presenta una débil sensibilidad a la variación de temperatura y además presenta una sensibilidad a la presión del orden de 10 veces mayor a la que presenta el sensor piezoresistivo. Sin embargo, la desventaja que presenta este tipo de transducción es la no linealidad de su característica voltaje-presión [6].

En la Figura 2.4 se muestra esquemáticamente un dado de silicio con un diafragma hecho de polisilicio, el cual sirve como uno de los electrodos del condensador mientras que el otro electrodo está formado por una difusión n+ sobre el substrato. El diafragma tiene un espesor de unas cuantas micras formando una pequeña cavidad. La separación entre los electrodos también es pequeña y el dieléctrico del capacitor es aire [6].

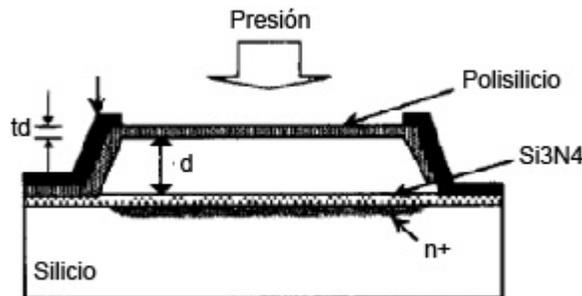


Figura 2.4.- Chip con Transducción Capacitiva.

El principio de funcionamiento del dispositivo es muy sencillo. Como el desplazamiento del diafragma es dependiente de la presión aplicada, la capacitancia es una función de la presión. Sin embargo, existen muchas dificultades asociadas con un transductor de presión capacitivo en las que se destaca el no lograr linealidad de la señal de salida y la existencia de capacidades

parásitas, especialmente cuando el circuito de acondicionamiento de señal no está integrado monolíticamente con el chip del sensor. Como se mencionó en el capítulo anterior, en nuestro sensor se emplea la tecnología CMOS-MEMS por lo que tanto la estructura del sensor como la electrónica del mismo se encuentran en un solo chip [6].

Es fácil de entender que estas dificultades son algo inherente a un transductor de presión capacitivo, aunque ha habido muchas mejoras en los diseños y tecnologías de fabricación.

2.3 Uso del Transistor FGMOS como transductor.

Las aplicaciones de los transistores MOS de compuerta flotante (FGMOS) tanto en circuitos analógicos como en circuitos digitales ha sido muy amplia, principalmente usados como memorias digitales. Como ejemplos, se puede mencionar que estos se han empleado en el diseño de circuitos de aprendizaje en modo analógico para Redes Neuronales Artificiales, para reducir el voltaje de polarización en circuitos que demanden baja potencia y bajo voltaje y para eliminar desacoplamientos entre transistores [16][17].

Con base a sus propiedades, estos dispositivos presentan características importantes que pueden ser utilizadas cuando se determinan las ventajas ó desventajas en el diseño de circuitos. Algunas de estas propiedades son:

- La compuerta flotante es una compuerta de polisilicio aislada por SiO_2 .
- La carga en la compuerta flotante puede ser almacenada permanentemente.
- La cantidad de potencia consumida es mínima.

Un transistor FGMOS tiene una compuerta aislada eléctricamente, de manera que no existe ninguna conexión en este nodo. Adicionalmente se puede

configurar con un número de compuertas o entradas secundarias que se acoplan capacitivamente con la compuerta flotante (FG) y que se llaman compuertas de control. La Figura 2.5 muestra el circuito equivalente de un FGMOS con N compuertas de control, además de las capacitancias parásitas inherentes de esta estructura. De esta manera, en términos de operación en DC, la compuerta flotante (FG) es un nodo flotante. Los circuitos basados en el transistor FGMOS consumen menos energía que el mínimo requerido de circuitos diseñado con transistores MOS [16] [17].

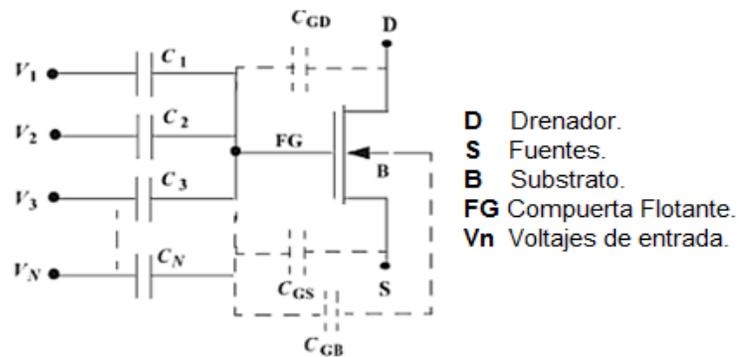


Figura 2.5.- Transistor de compuerta flotante con N entradas.

En la figura 2.6 se muestra un corte transversal de un transistor FGMOS con una sola compuerta de control V_{CG} , como es el caso de nuestro sensor de presión. De la figura se observa que el drenador y la fuente se encuentran en el substrato, posteriormente se tiene una capa de óxido de silicio por encima de esta capa; luego se tiene la compuerta flotante constituida de polisilicio 1 (Poly1 en términos de la tecnología CMOS) y finalmente se tiene la compuerta de control elaborada de poly2 (en términos de la tecnología CMOS).

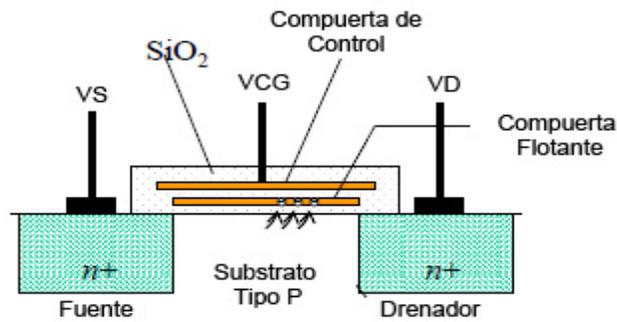


Figura 2.6.- Corte Transversal de un Transistor FGMOS.

De la figura anterior se concluye que el modelo del FGMOS contiene dos efectos capacitivos de suma importancia: el primero se forma entre las dos placas de polisilicio y a esta capacitancia se le denominará como C_{pp} ; la segunda capacitancia está formada entre la compuerta de polisilicio 1 que es la compuerta flotante y el sustrato, este efecto capacitivo recibe el nombre de C_{gox} . De lo anterior se puede obtener el circuito eléctrico equivalente simplificado del modelo, el cual se muestra en la figura 2.7.

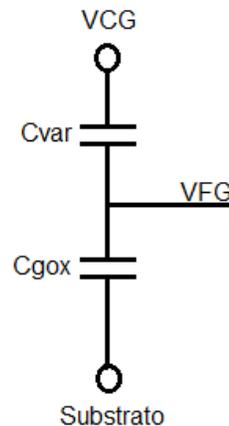


Figura 2.7.- Circuito Equivalente del FGMOS.

El voltaje de compuerta flotante dependerá de las compuertas de control que el diseño contenga, y en general está dado por la ecuación 2.12.

$$V_{FG} = K_{CG1} \cdot V_{CG1} + K_{CG2} \cdot V_{CG2} + \dots + K_{CGn} \cdot V_{CGn} + Q_{FG} \quad (2.12)$$

Donde:

K_{CGn} Coeficiente de acoplamiento variable para cada compuerta de control.

Q_{FG} Carga.

Del modelo eléctrico de las figuras 2.5 y 2.7 se obtiene el valor de la capacitancia total C_{TOT} , que se obtiene a partir de la suma algebraica de todas las capacitancias que se encuentran en el circuito eléctrico incluyendo las capacitancias parásitas.

$$C_{TOT} = C_{GD} + C_{GS} + C_{GB} + C_{var} \quad (2.13)$$

Específicamente, el coeficiente de acoplamiento considerando la capacitancia variable está dado por la siguiente expresión:

$$K_{CG} = \frac{C_{var}}{C_{TOT}} \quad (2.14)$$

En el caso del diseño que se presenta en el este trabajo, la capacitancia C_{var} se configura como una de las compuertas de control del FGMOS y uno de sus electrodos operará como la compuerta flotante de este dispositivo. Por lo tanto, se puede observar que si C_{var} varía en función de la presión, consecuentemente el voltaje en la compuerta flotante, V_{FG} también variará, por lo que la corriente a través del FGMOS variará para cada valor de presión aplicada al sensor de presión. De esta manera, se puede emplear al FGMOS como alternativa novedosa de transducción, diferente al método piezoresistivos y el puramente capacitivo.

2.4 Geometrías comunes de las membranas.

Otro aspecto importante a considerar para el diseño de los sensores de presión, tiene que ver con la geometría del diafragma, que como se verá en los siguientes capítulos, puede determinar en el rango de presión que se pueda medir. En esta sección se presentarán los aspectos teóricos del fundamento analítico que soporta el comportamiento de geometrías comunes, como la circular, la cuadrangular y la rectangular. A partir de ahí se podrán hacer comparaciones del desempeño de la estructura propuesta en esta tesis, para la cual no existen hasta el momento expresiones analíticas a partir de las cuales se pueda iniciar el diseño del sensor de presión que aquí se estudia. Sin embargo, la teoría existente puede servir de punto de partida para en un futuro, derivar las expresiones correspondientes a la geometría propuesta. Por el otro lado, desde el punto de vista tecnológico se puede mencionar que la elaboración de la membrana puede ser a partir de micromaquinado de volumen o de superficie, dependiendo del material de la membrana ya sea silicio monocristalino (micromaquinado volumétrico) o silicio policristalino (micromaquinado superficial). Estas membranas, como ya se mencionó, pueden tener la forma circular, rectangular y cuadrada, las cuales pueden ser tratadas como placas delgadas sujetas a una deflexión debida a una presión uniforme aplicada sobre éstas [20].

De esta manera, el primer paso a realizar con el fin de describir adecuadamente el comportamiento del dispositivo que va a ser fabricado es elegir el modelo matemático correcto. Actualmente, en la literatura se pueden encontrar dos modelos matemáticos donde el primero de ellos es el modelo de pequeña deflexión. Este modelo se emplea si la membrana se desplaza menos de la mitad de su espesor, de otro modo un modelo de gran deflexión sería más exacto. En cualquier caso, los dos modelos necesitan que:

1. Todas las fuerzas, cargas y reacciones deben ser normales al plano de la placa sobre la que se ejercen.
2. La placa sólo funcionará en régimen elástico.

2.4.1 Modelo de pequeña deflexión

Para placas delgadas en el régimen de trabajo de pequeña deflexión, lo que significa que la deflexión es menor que la mitad del espesor de la placa, el problema se puede simplificar mucho tomando las siguientes suposiciones:

- No hay ninguna deformación en el plano medio de la placa.
- Las fuerzas de deformación lateral pueden ser ignoradas.
- El estrés normal en la dirección transversal a la placa pueden ser ignorados.

Todos los componentes de la tensión pueden ser expresados como una función de z , es decir, el desplazamiento en la dirección normal.

Para el caso particular de una membrana circular fija en el borde, se puede afirmar que los momentos de flexión por unidad de longitud, es decir, T_l (longitudinal) y T_t (tangencial), están relacionados con las propiedades del material y para el desplazamiento, por las siguientes ecuaciones [20].

$$T_l = -D \left(\frac{d^2 z}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{dz}{dr} \right) \quad (2.15)$$

$$T_t = -D \left(v \frac{d^2 z}{dr^2} + \frac{1}{v} \frac{dz}{dr} \right) \quad (2.16)$$

Donde:

D Rigidez de la membrana.

v Razón de Poisson.

r Desplazamientos de la membrana

Suponiendo que la membrana recibe una carga uniformemente distribuida sobre el eje z (normal a la membrana) y dadas las condiciones de contorno se tiene que:

$$Z(a) = 0, \quad \frac{dz}{dr} \Big|_{r=a} = 0, \quad \frac{dz}{dr} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2.17)$$

$$Z(r) = \frac{P}{64D} (a^2 - r^2)^2 \quad (2.18)$$

Entonces, conociendo la forma de la deflexión de la membrana, la capacitancia entre la placa inferior puede ser evaluada utilizando la ecuación 2.19. El emplear esta ecuación nos permite realizar la integración en toda el área de la membrana, esto con la finalidad de tomar el valor de capacitancia que se presenta en cada punto de la misma ya que aun cuando son placas paralelas, la deformación es en forma de arco. Es importante señalar que esta integración se realizó para las simulaciones correspondientes del modelo del sensor lo cual se detallara en capítulos posteriores, ya que se empleó el paquete de simulación por elementos finitos llamado COMSOL.

$$C = \iint \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_v \varepsilon_i r}{\varepsilon_v t + \varepsilon_i [d - z(r, \theta)]} dr d\theta \quad (2.19)$$

Donde:

t *Espesor de la membrana.*

ε_0 *Constante dielectrica del vacío.*

ε_v *Constante dielectrica del aire.*

ε_i *Constante dielectrica del SiO₂.*

En la figura 2.8 se muestran las variables de integración, donde r es la distancia radial desde el centro de la membrana y θ es la coordenada angular [20].

$$A_1 = \pi \varepsilon_0 \varepsilon_v \varepsilon_i \quad A_2 = \varepsilon_v t + \varepsilon_i d \quad A_3 = \frac{\varepsilon_i Z_0}{A_2}$$

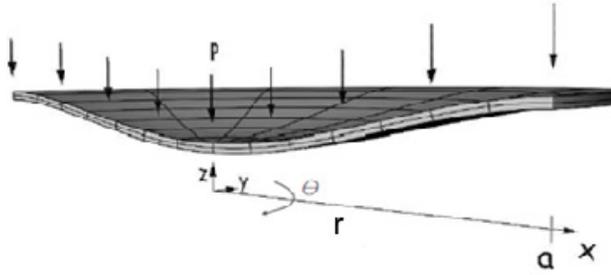


Figura 2.8.- Deflexión de una membrana circular.

Con lo anterior, la capacitancia que se presenta en la placa inferior se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$C = 2 \frac{A_1}{A_2} \int_0^a \frac{1}{1 - A_3(a^2 - r^2)^2} dr \quad (2.19)$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_v \varepsilon_i \pi a^2}{\varepsilon_v t + \varepsilon_i d - \varepsilon_i \omega} \quad (2.20)$$

Donde:

C_0 Capacitancia en reposo (sin presión aplicada).

La expresión para la capacitancia bajo pequeñas cargas aplicadas puede desarrollarse en una serie de Taylor, pero se establece un límite para la tensión máxima, aplicable al cancelar un grado de libertad debido a la relación que vincula el radio de la membrana y su espesor con sus propiedades mecánicas [20].

A continuación, la ecuación 2.21 permite obtener el esfuerzo máximo que se presenta en la membrana en función de la presión aplicada y de la geometría de la misma. La ecuación 2.22 nos permite además, obtener el desplazamiento máximo de la membrana en función de la presión aplicada.

$$\sigma_{max} = \frac{3P_{max}a^2}{4t^2} \quad (2.21)$$

Donde:

σ_{max} Esfuerzo máximo.

P_{max} Presión máxima.

t Espesor de la membrana.

a Longitud del lado de la membrana.

$$d_{max} = \frac{12P_{max}a^4(1 - \nu^2)}{0.9 * 64Et^3} \quad (2.22)$$

Donde:

d_{max} Desplazamiento máximo.

ν Razón de Poisson.

E Módulo de Young.

Se puede conocer la sensibilidad de un sensor de presión y está dada por la ecuación 2.23.

$$S = \frac{dC}{dP} \quad (2.23)$$

Sin embargo, en el modelo de pequeña deflexión, la tarea de bajar la capacitancia y aumentar la sensibilidad de los chips un compromiso difícil, ya que un aumento de la sensibilidad generará al mismo tiempo un aumento en la

capacitancia de presión cero [20]. En un momento dado, esto puede llevar a un coeficiente de acoplamiento del FGMOS cercano a 1 y en consecuencia enmascarar las demás capacitancias asociadas a la estructura e impedir por lo que la ecuación 2.12 perdería funcionalidad ya que no se lograría propiamente un coeficiente de acoplamiento variable.

2.4.2 Modelo de grande deflexión.

El problema que surge cuando la membrana entra en el régimen de grande deflexión, está dado por el hecho de que el esfuerzo del plano medio de la placa debe ser tomado en cuenta. Para ello una función del esfuerzo, $F(x, y)$, se debe incluir y las fuerzas corporales en los bordes fijos deben ser considerados.

Para este caso, la deflexión en el punto central de la placa se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Z_0 = \frac{Pa^4}{64D} \frac{1}{1 + 0.488 \frac{Z_0^2}{t^2}} \quad (2.24)$$

Evidentemente, la ecuación anterior no se puede resolver analíticamente; toda la información necesaria para diseñar el sensor puede ser obtenida o, al menos, una buena aproximación a partir de las siguientes consideraciones [20].

1. La presión del punto de contacto, la cual se describe con la ecuación 2.25.

$$P = \frac{64Dd \left(1 + 0.488 \frac{d^2}{t^2}\right)}{a^4} \quad (2.25)$$

Donde:

d es el Gap.

t es el espesor de la membrana.

a radio de la membrana.

D rigidez de la membrana

2. La capacitancia de la presión atmosférica.

Además, se debe de considerar que para alcanzar la sensibilidad más alta posible, la razón $\frac{z_0}{d_{max}}$ debe ser tan cercana a 1 como sea posible. Se sugiere forzar esta relación a un valor de 0,9, lo que dará como resultado una ecuación que relaciona todas las variables geométricas.

2.4.3 Deflexión de placa circular con bordes fijos.

Las siguientes expresiones representan las soluciones para una placa circular con un radio a y un espesor h . La placa es sujeta a una presión uniforme P [1].

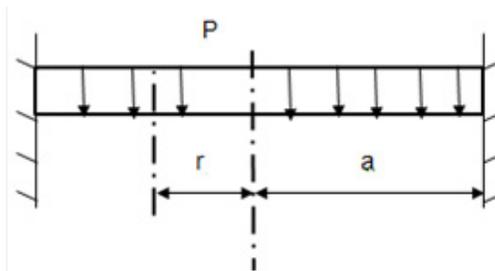


Figura 2.9.- Membrana Circular.

El esfuerzo máximo radial en el borde es:

$$(\sigma_{rr})_{max} = \frac{3\omega}{4\pi h^2} \quad (2.26)$$

y el máximo esfuerzo de arco (tangencial) en el borde es:

$$(\sigma_{\theta\theta})_{max} = \frac{3\nu\omega}{4\pi h^2} \quad (2.27)$$

Ambos esfuerzos en el centro de la placa llegan a ser:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{3\nu\omega}{8\pi h^2} \quad (2.28)$$

La máxima deflexión se presenta en el centro de la placa y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$W_{max} = -\frac{3\omega(m^2 - 1)a^2}{16\pi Em^2 h^2} \quad (2.29)$$

Donde:

$$\omega = (\pi a^2)P$$

$$m = \frac{1}{\nu}$$

P es la presión aplicada.

El signo negativo indica el sentido en que se presenta la deflexión.

2.4.4 Deflexión de placa rectangular con bordes fijos.

En este tipo de placas se tienen dos diferentes valores para las dimensiones de la placa (*a* y *b*) y un espesor *h* [1].

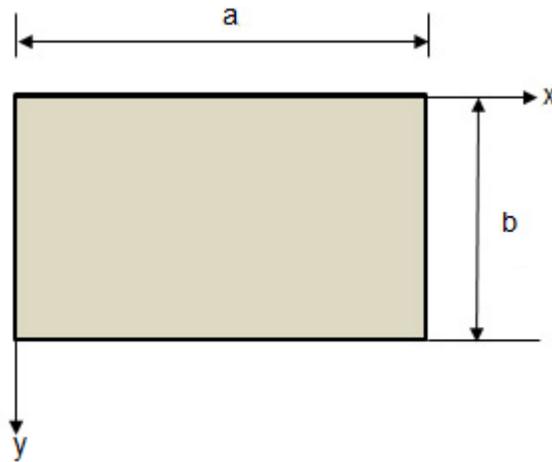


Figura 2.10.- Membrana Rectangular.

El esfuerzo máximo ocurre en el centro del borde más largo.

$$(\sigma_{yy})_{max} = \beta \frac{Pb^2}{h^2} \quad (2.30)$$

Y la máxima deflexión ocurre en el centro de la placa.

$$W_{max} = -\alpha \frac{Pb^4}{Eh^2} \quad (2.31)$$

Los coeficientes α y β de las ecuaciones anteriores se pueden determinar a partir de la tabla 2.5.

a/b	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞
α	0.0138	0.0188	0.0226	0.0251	0.0267	0.0277	0.0284
β	0.3078	0.3834	0.4356	0.4680	0.4872	0.4974	0.5000

Tabla 2. 5.- Parámetros α y β en función de las dimensiones de la membrana.

2.4.5 Deflexión de placa cuadrangular con bordes fijos.

Los diafragmas cuadrados son los más comunes en sensores de presión. Esta geometría es favorable debido a la simetría que presenta esta estructura además de la fácil elaboración en el proceso de fabricación [1].

Aquí los dos lados de la placa son iguales es decir $a=b$.

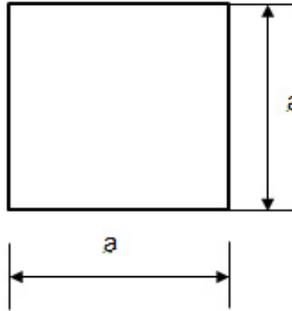


Figura 2.11.- Membrana Cuadrada.

Para esta geometría el esfuerzo máximo ocurre en el centro de cada borde:

$$\sigma_{max} = \frac{0.308Pa^2}{h^2} \quad (2.32)$$

Y la máxima deflexión de la placa ocurre en el centro de la misma:

$$W_{max} = -\frac{0.0138Pa^4}{Eh^3} \quad (2.33)$$

El esfuerzo en el centro de la placa puede expresarse de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{6P(m+1)a^2}{47mh^2} \quad (2.34)$$

Finalmente en la tabla 2.6 se observa una comparativa de las tres geometrías del diafragma que se pueden encontrar en la literatura, considerando que se tiene la misma área, espesor y la presión aplicada. Aparentemente la geometría cuadrada resulta la menos favorable desde ambos puntos de vista

esfuerzo y deflexión. Sin embargo, por la facilidad de corte de la oblea y la simetría de la misma, es todavía la geometría más popular en la industria de sensores de presión.

Geometría del Diafragma	Esfuerzo Máximo Mpa.	Deflexión Máxima μm
Circular	7000	55.97
Rectangular (a/b=2.0)	7293	21.76
Cuadrada	9040	43.00

Tabla 2. 6.- Comparación de esfuerzo y deflexión entre las diferentes geometrías de membrana.

2.5 Elección de la tecnología CMOS.

Como ya se había mencionado, el diseño del prototipo que se presenta en esta tesis se basa en los procedimientos y capas usadas en la tecnología CMOS estándar, que se complementarían con un micromaquinado superficial para la liberación de la membrana que operará como el sensor. Por lo tanto, a continuación se da un breve panorama de los pasos empleados en esta tecnología para la fabricación de dispositivos para poner en claro el contexto sobre las capas que se aprovechan para la construcción del sensor de presión.

La tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) es una de las técnicas de fabricación de circuitos integrados más empleadas en la actualidad. En la figura 2.12 se ilustra la sección transversal de los transistores que se pueden implementar en la tecnología CMOS, es decir, un transistor MOS canal N y un transistor MOS canal P.

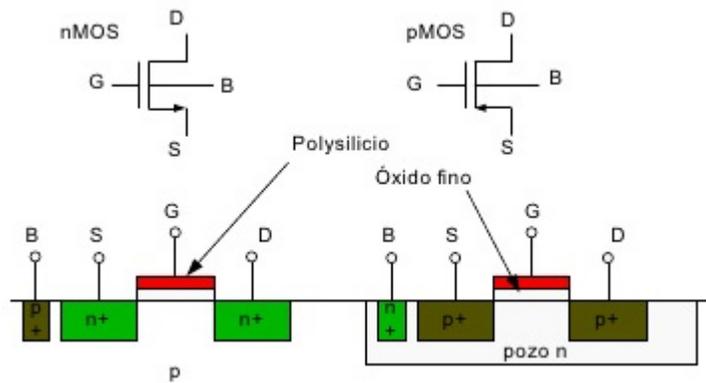


Figura 2.12.- Tecnología CMOS.

A continuación se tiene un listado donde se mencionan algunos pasos más comunes que se realizan para la fabricación de un dispositivo CMOS.

- Oxidación.
- Fotolitografía
- Apertura de ventanas en el óxido.
- Eliminación de fotoresina.
- Depósito de óxido.
- Eliminación de óxido.
- Depósito de metal.
- Se realizan contactos.
- Corte de la oblea.
- Encapsulado.
- Soldadura del chip al soporte del encapsulado.
- Soldadura de los hilos de conexión a los PADS del chip.
- Encapsulado.

Esta tecnología puede trabajar en un rango de voltaje que se encuentra entre 4.75 [V] y 5.25 [V], con la ventaja añadida que su consumo es de alrededor 10 veces menor que el obtenido por la familia TTL. El rechazo o inmunidad al ruido es el factor que le hace ser más utilizada esta familia en la industria.

Ahora bien el proceso de fabricación que se realiza para obtener la estructura final del modelo, que en este caso es un sensor de presión, depende del fabricante, reglas de diseño y la tecnología empleada que éste mismo presente.

Para el sensor de presión diseñado, se empleó la tecnología MOSIS On Semiconductor (0.5 μ m, pozo N, doble polisilicio, doble metal), la cual nos permite utilizar 7 capas para la fabricación del dispositivo; las cuales se observan en la figura 2.13.

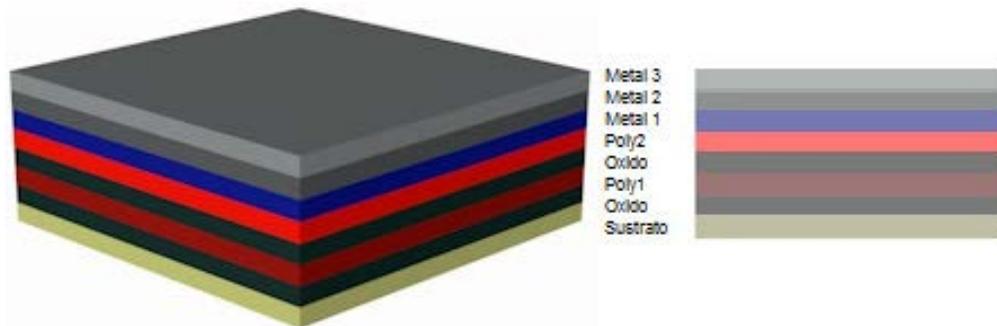


Figura 2.13.- Capas de la Tecnología MOSIS On Semiconductor (0.5 μ m)

2.6 Diseño de la estructura MEMS.

Tanto el diseño de la estructura como todo el diseño del sensor dependerán considerablemente de la tecnología empleada, debido a que el espesor de la membrana que se emplea depende de los espesores de algunas de las capas que nos proporciona esta tecnología.

En este caso, para obtener la membrana del sensor se utilizaron 3 de las 7 capas disponibles, que fueron: poly2, metal1 y metal2. La tecnología proporciona el valor de los espesores que maneja cada capa; para el caso del poly2 el espesor que establece dicha tecnología es de $0.4\mu\text{m}$, para metal1 es de $0.6\mu\text{m}$ y para metal2 es de $1.15\mu\text{m}$, dando un espesor total de $2.15\mu\text{m}$; en la figura 2.14 se ilustra la estructura final de la capa.

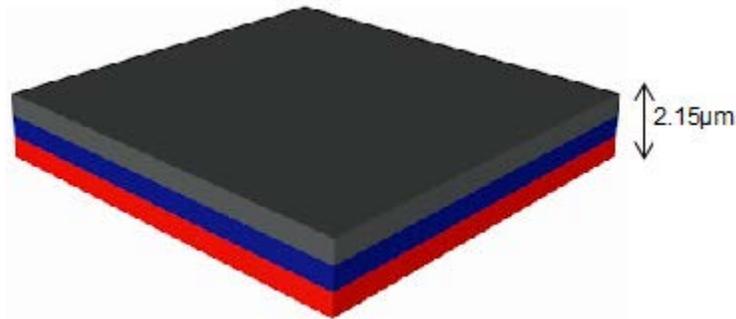


Figura 2.14.- Capas que conforman la membrana del sensor.

Es importante recalcar que las capas que se encuentra en la parte inferior a estas (Poly1 y Óxido de silicio) se eliminan para generar un distancia de separación (d) entre el sustrato y la membrana, como se muestra en la figura 2.15.

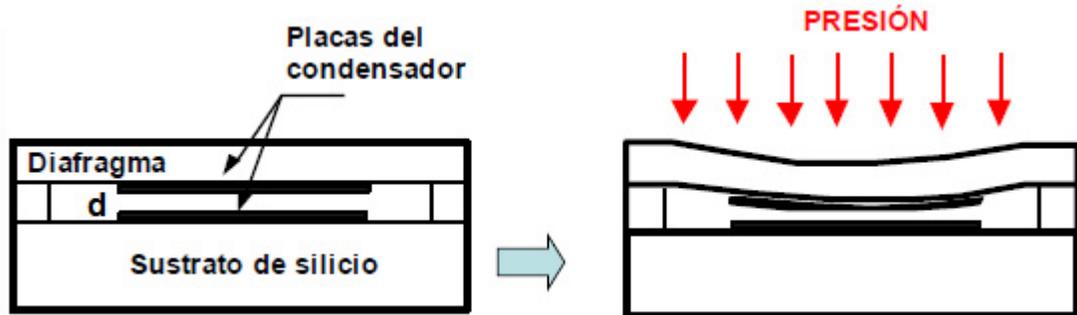


Figura 2.15.- Separación (d) entre las placas del capacitor

Una vez establecidas las capas que conforman el espesor final de la membrana, ahora se puede establecer la secuencia para el proceso de la fabricación de ésta. Primero se establecen las dimensiones de la membrana mediante la fotolitografía; posteriormente se crecen las capas sobre el sustrato (óxido, poly1, óxido, poly2, metal1, metal2 y metal3). En el modelo del sensor de presión se requiere que no exista ningún material debajo de la membrana, por lo que se debe eliminar las capas de poly1 y óxido de silicio que se encuentran por debajo de la capa de poly2. Para lograr esto, se sugiere la realización de un micromaquinado de volumen incompleto. Hasta este punto, la membrana no queda suspendida aún, pero las paredes laterales de la membrana quedan expuestas y esto se puede aprovechar para que las soluciones decapantes puedan empezar a remover el material respectivo. Es decir, se deben eliminar tanto el óxido de silicio, como el poly1, por lo que se deberán usar decapantes selectivos para cada uno de estos materiales. Las caras expuestas para lograr lo anterior, se pueden apreciar en la Figura 2.16. Como se puede apreciar, la membrana estará sostenida por cuatro brazos que operarán como “anclas”. Esta estructura es diferente a las membranas tradicionalmente reportadas, ya que se no está anclada por los cuatro lados de la membrana.

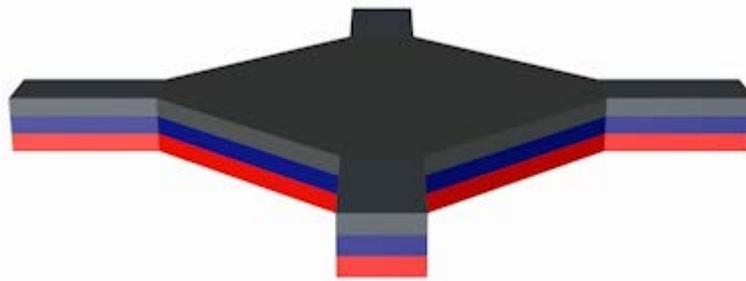


Figura 2.16.- Estructura del sensor con brazos.

Es importante señalar que el modelo de la estructura propuesta para el sensor no se ha sido reportado en la literatura.

Una ventaja que presenta esta estructura para facilitar el micromaquinado, es que se generan cuatro ventanas por donde el agente decapante puede circular para eliminar la capa de Poly1 y óxido de silico y así lograr liberar la membrana. La figura 2.17 se muestran una vista superior de la estructura propuesta donde se observan las cuatro ventanas.

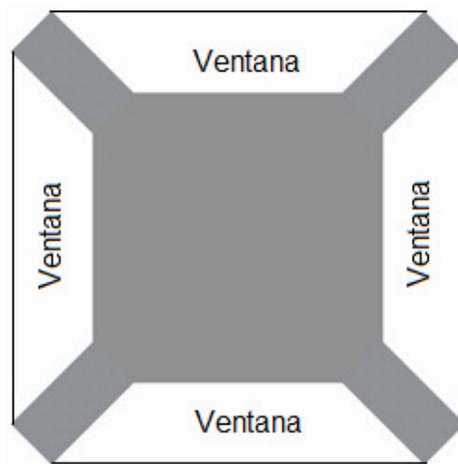


Figura 2.17.- Ventanas por las cuales entra el agente decapante.

Por otro lado, un problema que presenta esta configuración, es que si el agente decapante que ingresa por las ventanas circula por todas direcciones, causa que el material que rodea la estructura del sensor y que sirve como ancla, también sería atacado, debilitando al soporte de la membrana. Para evitar esto, la figura 2.18 muestra la solución a dicho problema la cual consiste en diseñar una mascarilla que proteja con resina las paredes exteriores de las ventanas, a una distancia dada, para evitar que el agente decapante actúe sobre estas paredes.

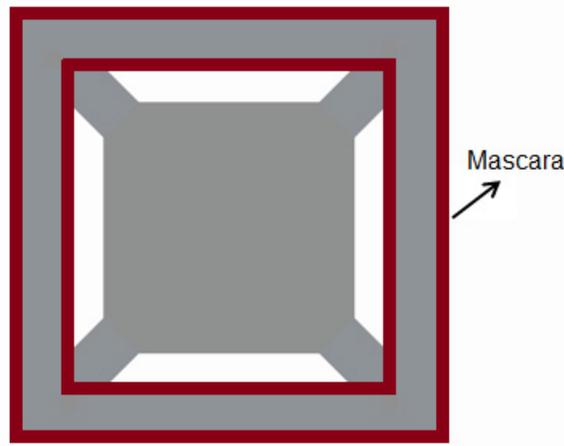


Figura 2.18.- Mascara que evita que el decapante elimine las paredes externas al sensor.

Con lo anterior se termina por completo el diseño de la estructura MEMS para el sensor de presión propuesto en este trabajo. En la figura 2.19 se presenta un esquema del diseño final de la estructura para el sensor de presión.

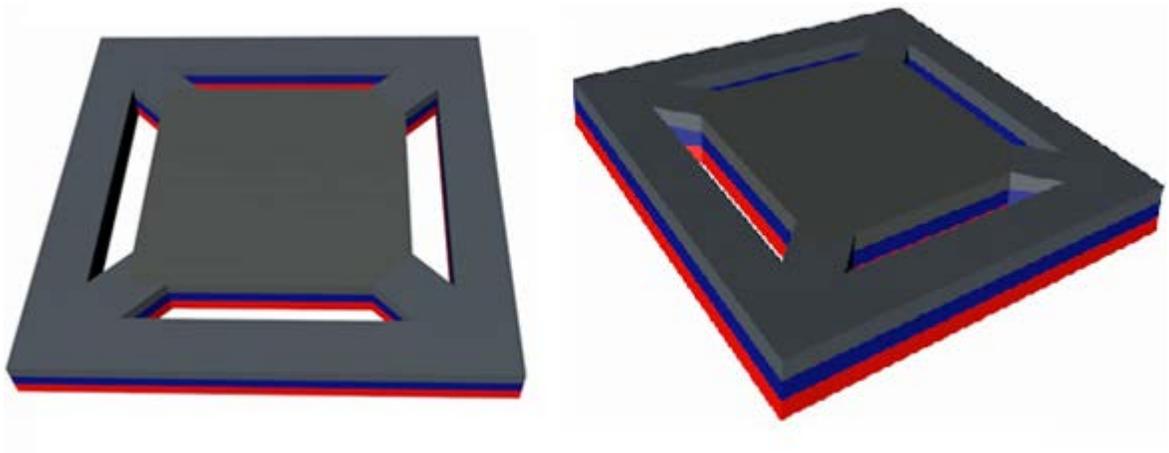


Figura 2.19.- Vista en 3D de la estructura final.

2.7 Conclusiones.

En el presente capítulo se mencionaron las diferentes opciones de transducción que regularmente se emplean en los sensores de presión, como el piezoresistivo y el capacitivo, así como sus ventajas y desventajas. También expuso la base teórica a partir de la cual se diseñan los sensores de presión MEMS y los diferentes parámetros de los que dependen los dos métodos de transducción mencionados, tomando como plataforma de diseño, la tecnología CMOS. Se hace la propuesta de emplear al transistor MOS de compuerta flotante como alternativa novedosa de transducción, ya que hasta el momento, esto no se encuentra reportado en la literatura. Finalmente, se presenta el diseño del prototipo propuesto, basado en una tecnología CMOS estándar, con la cual se pudiera llegar a fabricar.

Diseño del Sistema.

3.1 Introducción.

Como se mencionó en el capítulo anterior se tomó como base el diseño del sensor de presión la tecnología de $0.5\mu\text{m}$ y con base a los parámetros que esta tecnología establece, en este capítulo se presentarán los cálculos correspondientes al diseño del sensor de presión. Primeramente se define la geometría de la membrana, la cual, para este sensor se empleó una membrana cuadrada, debido a que es la geometría más común en el mercado y por la facilidad en su elaboración. Posteriormente, se analizan las variantes para el rango de presión que se obtiene en función de las dimensiones de la membrana con base a los parámetros de la tecnología escogida, así como las magnitudes de capacitancias resultantes de las diferentes dimensiones consideradas para la membrana. Este último parámetro es relacionado con el funcionamiento del transistor FGMOS, para considerarlo en el análisis del coeficiente de acoplamiento variable, que será el principio sobre el que se basará la operación del sensor de presión, a través del transistor FGMOS.

3.2 Diseño geométrico del sensor.

En función de las capas disponibles en la tecnología elegida y con el propósito de contar con una membrana cuyo espesor ayudara a contemplar un rango relativamente alto de presiones, el valor del espesor de la membrana resulta en $2.15\mu\text{m}$, que se mostró en la sección 2.5 del capítulo 2; la distancia de separación d que existe entre el substrato y la capa de poly2, así como las longitudes de los lados de la membrana son factores muy importantes que permiten establecer el rango de presión del sensor.

3.2.1 Separación entre electrodos.

El primer factor lo establece la tecnología empleada, es decir, la distancia de separación d se genera al eliminar las capas de poly1 y óxido de silicio (mediante micromaquinado superficial) por lo a partir de los parámetros proporcionados por la tecnología, la distancia d resulta de la ecuación (3.1):

$$d = d_{poly2-poly1} + d_{poly1-subst.} + h_{poly1} \quad (3.1)$$

Se debe hacer notar que al eliminar el poly1 y el óxido de silicio entre la membrana y el substrato, el dieléctrico del capacitor formado será el aire, por lo que en la ecuación (3.2) el valor considerado para ϵ_{aire} deberá ser de 1. De la misma manera, a partir de los datos que nos proporciona la tecnología y conociendo la separación entre electrodos, la capacitancia del sensor de presión en estado de reposo, es decir, sin presión aplicada, se puede calcular con la con ecuación (3.2) [6]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{aire}}{d} \quad (3.2)$$

Donde:

C Capacitancia entre capas.

ϵ_0 Constante dieléctrica del vacío.

ϵ_{aire} Constante dieléctrica del aire .

d Separación entre capas.

En la tabla 3.1 se muestran los valores de capacitancia que existen entre las capas involucradas y así como el espesor de la capa de poly1 que proporciona la tecnología sobre la que se basa el diseño considerado en esta tesis.

Parámetro.	Valor.
h_{poly1}	0.4[μm]
$C_{poly2-poly1}$	$887 \times 10^{-18} \left[\frac{F}{\mu m^2} \right]$
$C_{poly1-substrato}$	$84 \times 10^{-18} \left[\frac{F}{\mu m^2} \right]$

Tabla 3. 1.- Parámetros proporcionados por la tecnología de 0.5 μm , doble poly, doble metal, pozo N.

Tomando los valores de la tabla 3.1 y aplicando las ecuaciones (3.1) y (3.2), se encuentra la separación que tendrán las placas del capacitor que conformará al sensor de presión:

$$d_{poly2-poly1} = \frac{\epsilon_0}{C_{poly2-poly1}} = \frac{3.97 * 8.85 \times 10^{-18} \left[\frac{F}{\mu m} \right]}{887 \times 10^{-18} \left[\frac{F}{\mu m^2} \right]} = 0.03971 [\mu m]$$

$$d_{poly1-sustrato} = \frac{\epsilon_0}{C_{poly1-sustrato}} = \frac{3.97 * 8.85 \times 10^{-18} \left[\frac{F}{\mu m} \right]}{84 \times 10^{-18} \left[\frac{F}{\mu m^2} \right]} = 0.4182 [\mu m]$$

Por lo tanto, el valor de la separación total entre electrodos del capacitor es:

$$d = d_{poly2-poly1} + d_{poly1-subst.} + h_{poly1}$$

$$d = 0.03971\mu m + 0.4182\mu m + 0.4\mu m$$

$$d = 0.8591\mu m$$

El segundo factor que afecta directamente para establecer el rango de presión se determina a partir de la ecuación (3.3) que fue mostrada en el capítulo 2, la cual permite obtener el valor del desplazamiento máximo en función de la presión aplicada [1].

$$W_{max} = -\frac{0.0138Pa^4}{Eh^3} \quad (3.3)$$

Donde:

E es el módulo de Young (129.5 GPa para silicio orientación <100>).

h Espesor de la membrana.

Por lo tanto, el desplazamiento máximo a considerar para el sensor bajo diseño, debe ser muy cercano pero no mayor a la distancia *d*, esto con la finalidad de evitar que las capas de poly2 y substrato tengan contacto entre sí al momento de aplicar una presión sobre la superficie de la membrana. De lo anterior se establece uno de los criterios de diseño de la estructura del sensor, donde W_{max} será el máximo desplazamiento de la placa flexible y que se especifica a continuación:

$$W_{max} \approx d = 0.8591\mu m$$

3.2.2 Rango de presión del sensor.

Una vez establecido el criterio anterior y conociendo el valor de desplazamiento máximo del sensor a diseñar, a continuación se puede conocer la presión máxima para los siguientes valores propuestos de longitud por lado de la membrana cuadrada: 500 μm , 400 μm , 300 μm y 200 μm . En la tabla 3.2 se muestran los datos obtenidos para cada geometría a partir de la ecuación (3.3), donde se observa que para el valor de longitud de lado más pequeño el valor de presión máxima (al desplazamiento máximo considerado) que puede ser aplicada sobre la membrana es más grande, es decir, la presión máxima es inversamente proporcional a la longitud de la membrana. Este resultado muestra que desplazar una membrana una distancia dada, requerirá de mayor presión entre más pequeña sea. Este comportamiento es similar para membranas de la misma dimensión, pero con espesores diferentes ya que entre mayor sea el espesor de la membrana, mayor presión se requerirá para desplazarla una cierta distancia.

Longitud del lado [μm].	Presión máxima [Pa]
500 μm	1.2819K
400 μm	3.1298K
300 μm	9.8916K
200 μm	50.076K

Tabla 3. 2.- Valores de desplazamiento para diferentes longitudes de membrana.

En la figura 3.1 se muestra la variación del desplazamiento conforme se va incrementando la presión aplicada sobre la membrana para los mismos valores de longitud propuestos en la Tabla 3.2, lo cual confirma la conclusión derivada

anteriormente. En la figura se observa una línea recta que cruza en un valor de $0.8\mu\text{m}$ debido a que para todos los casos se consideró un desplazamiento máximo de ese valor, esto con la finalidad de contar con un rango de tolerancia para evitar que las placas del capacitor realicen contacto en algún momento. Cabe mencionar que los valores de desplazamiento se obtuvieron de manera teórica y que en el siguiente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos a partir de las simulaciones para este parámetro. Como se mencionó en el capítulo anterior, la geometría propuesta para el sensor de presión contiene elementos extra agregados a una membrana cuadrada, por lo que el análisis analítico sirve como base para determinar la tendencia que deberá seguir la geometría elegida y desarrollada en esta tesis.

En la sección 2.5 del capítulo 2 se pueden ver los brazos con los que es soportada la membrana, lo cual introducirá efectos adicionales a los analizados con una geometría cuadrada anclada completamente por sus cuatro lados. Esto se podrá determinar mediante el análisis basado en elementos finitos (COMSOL), que se presentará en el siguiente capítulo.

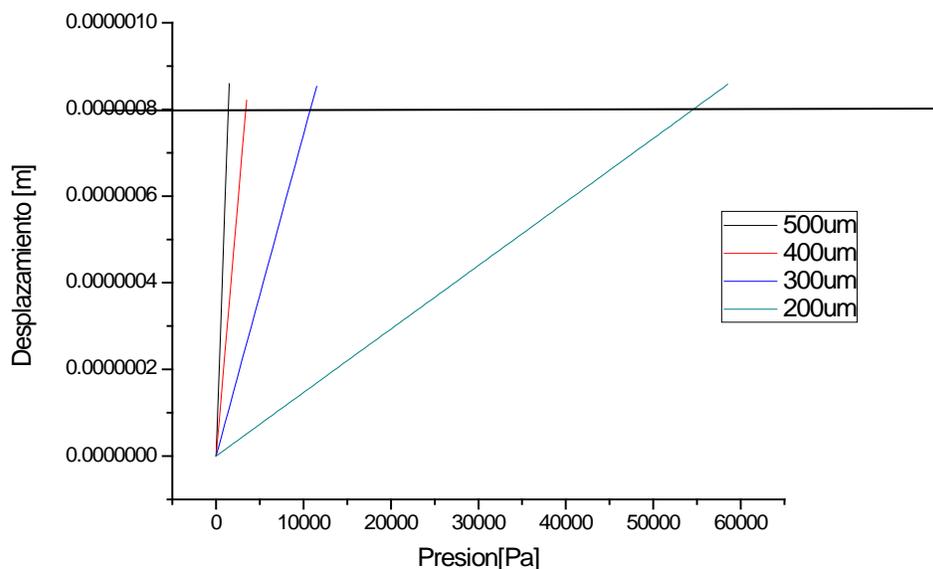


Figura 3.1.- Gráfico del desplazamiento vs presión para diferentes longitudes de membrana.

3.2.3 Capacitancia máxima.

El siguiente parámetro a calcular es la capacitancia máxima también en función de la presión aplicada. Este cálculo se realiza a partir de la ecuación 3.4 la cual permite obtener el valor máximo permitido sin que las placas entren en contacto entre sí [6].

$$C_{max} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{aire} A}{gap + w} \quad (3.4)$$

Donde:

gap Separación entre poly2 – sustrato.

w Desplazamiento de la membrana en función de la presión aplicada.

A Área de la membrana.

En la tabla 3.3 se presentan los valores máximos de capacitancia para las diferentes longitudes propuestas para un desplazamiento máximo de 0.8µm. Como el desplazamiento máximo es el mismo para todos los casos se observa que el valor de longitud más pequeño entrega un valor de capacitancia menor, esto es por la capacitancia obtenida es por unidad de área.

Longitud del lado [µm].	Capacitancia máxima [F]
500µm	3.74x10 ⁻¹¹
400µm	2.40x10 ⁻¹¹
300µm	1.35x10 ⁻¹¹
200µm	5.99x10 ⁻¹²

Tabla 3. 3.- Valores de capacitancia para diferentes longitudes de membrana.

En la figura 3.2 se presenta el comportamiento de la capacitancia como función de la presión aplicada sobre la membrana, para un rango de presión desde 0 hasta 60,000[Pa]. Nuevamente se concluye que la membrana con una longitud de 200µm entrega un mayor rango de capacitancia, por lo que esta será la longitud que se considerará para el diseño del sensor de presión propuesto. De igual manera, el comportamiento de este parámetro se presentará en el siguiente capítulo a partir de las simulaciones generadas, considerando la estructura de una membrana cuadrada soportada por cuatro puentes anclados en cada esquina, que para ese caso, extienden la geometría cuadrada que se considera en la teoría, por lo que es evidente que los resultados serán diferentes a los obtenidos, pero que se espera que la tendencia observada con la geometría cuadrada se mantenga.

En la figura 3.2 se observa que la capacitancia se incrementa conforme la presión aplicada va aumentando, debido a que se genera un desplazamiento en la membrana disminuyendo la distancia que existe entre poly2 y el substrato y como resultado de que la separación entre los electrodos es el denominador de la ecuación 3.4. Cuando este valor tiende a cero, la capacitancia tenderá a infinito. Este desplazamiento se limitará para evitar que esto se presente.

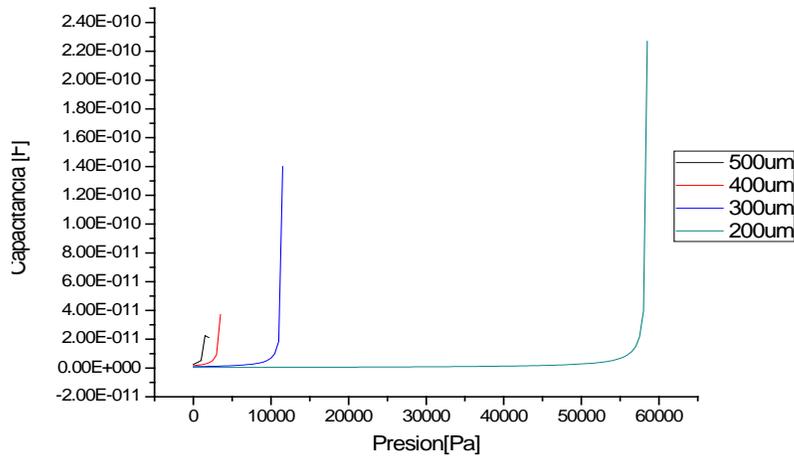


Figura 3.2.- Gráfico de la variación de capacitancia vs presión para diferentes longitudes de membrana.

Como se mencionó anteriormente, el valor de longitud seleccionada para la membrana del diseño del sensor es de 200 μm . En la tabla 3.4 se muestran los valores de desplazamiento y capacitancia para el rango de presión obtenido que va de 0 [Pa] a 58500 [Pa], y se observa que el desplazamiento máximo mostrado no es superior a la distancia de separación d entre placas.

Presión [Pa]	Desplazamiento [μm]	Capacitancia [F]
0	0	4.12×10^{-13}
5,000	0.085	4.58×10^{-13}
10,000	0.172	5.15×10^{-13}
15,000	0.257	5.88×10^{-13}
20,000	0.343	6.86×10^{-13}
25,000	0.429	8.23×10^{-13}
30,000	0.515	1.03×10^{-12}
35,000	0.600	1.37×10^{-12}
40,000	0.686	2.05×10^{-12}
45,000	0.772	4.07×10^{-12}
46,631	0.800	5.99×10^{-12}

Tabla 3. 4.- Parámetros de desplazamiento y capacitancia para la membrana con una longitud de 200 μm por lado.

3.3 Acoplamiento de la membrana con el FGMOS.

El parámetro de capacitancia juega un papel importante para la operación del sensor de presión propuesto, debido a que se emplea un transistor de compuerta flotante (FGMOS) como método de transducción. Los valores de capacitancia mostrados en la tabla 3.4 se emplearon para realizar la simulación en PSPICE para el diseño del FGMOS.

Para realizar dicha simulación es necesario crear dos archivos y posteriormente guardarlos como librerías. El primero de ellos contiene el modelo del transistor de compuerta flotante FGMOS y el segundo los parámetros de los

transistores convencionales NMOS y PMOS de MOSIS para la tecnología de $0.5\mu\text{m}$ los cuales se muestran en el Apéndice A y B respectivamente [21] [22].

En el capítulo anterior se mencionó que el transistor FGMOS puede contener n compuertas de control y que específicamente para nuestro diseño, solo contiene una compuerta de control. En la figura 3.3 se muestra el circuito eléctrico equivalente del sensor de presión con una sola compuerta de control señalada como V_{CG} . También se observa que se empleará un espejo de corriente y un convertidor Corriente-Voltaje para la lectura de la señal de salida del sensor.

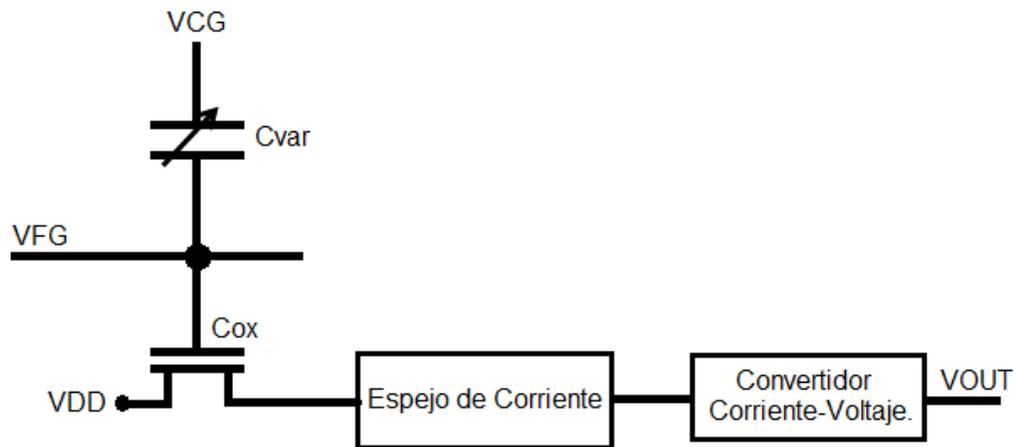


Figura 3.3.- Circuito eléctrico equivalente del sensor de presión.

En esta figura se tiene que:

V_{CG} Es el voltaje de la compuerta de control.

V_{FG} Es el voltaje de compuerta flotante.

C_{var} Es la capacitancia que varía su valor en función de la presión aplicada, la cual está constituida por las capas poly2 y sustrato.

C_{ox} Es la capacitancia de óxido de canal; esta capacitancia la entrega un transistor NMOS donde el valor de capacitancia dependerá del tamaño del transistor.

La figura 3.4 muestra el resultado de la simulación donde se emplearon los valores de capacitancia de la tabla 3.4. En esta figura, se gráfica la corriente de drenador del FGMOS en función del voltaje aplicado a la compuerta de control, V_{CG} , y se observa que para un valor fijo de V_{CG} , el valor de corriente I_{DS} se incrementa con el valor del voltaje de compuerta flotante, V_{FG} . Recordando las ecuaciones (2.12) y (2.13), se puede ver que debido a que el coeficiente de acoplamiento K_{CG} aumenta su valor al aumentar la capacitancia de la membrana, en respuesta a un aumento de presión, esto se ve reflejado en un aumento en V_{FG} . La simulación se hizo con un barrido de V_{CG} desde cero volts hasta 5 volts, con V_{DS} fijo a 5 volts, para un transistor NMOS de aspecto geométrico W/L de $9\mu\text{m}/6\mu\text{m}$ ($30\lambda/20\lambda$).

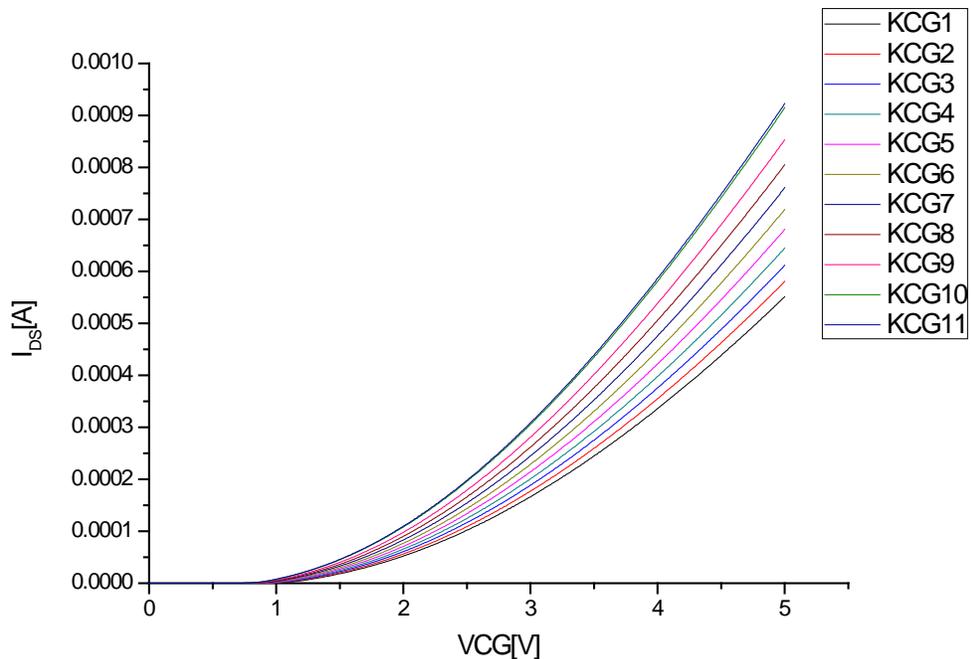


Figura 3.4.- Gráfico de I_{DS} vs V_{CG} empleando los valores de capacitancia (C_{var}) mostrados en la Tabla 3.4.

Por otro lado, en la siguiente figura 3.5 se muestra la variación del voltaje de compuerta flotante V_{FG} en función del voltaje de compuerta de control, V_{CG} . Esto es equivalente a variar el coeficiente de acoplamiento K_{CG} , y se observa que

V_{FG} incrementa su valor cuando K_{CG} aumenta, es decir, cuando la capacitancia aumenta (se consideraron las capacitancias mostradas en la Tabla 3.4). Con este resultado, se puede anticipar que la corriente del FGMOS aumentará a medida que se aumente la presión sobre la membrana del sensor. Esto se puede comprobar mediante la figura 3.6, donde se grafica la corriente de drenador del FGMOS en función de la presión aplicada (ver Tabla 3.4).

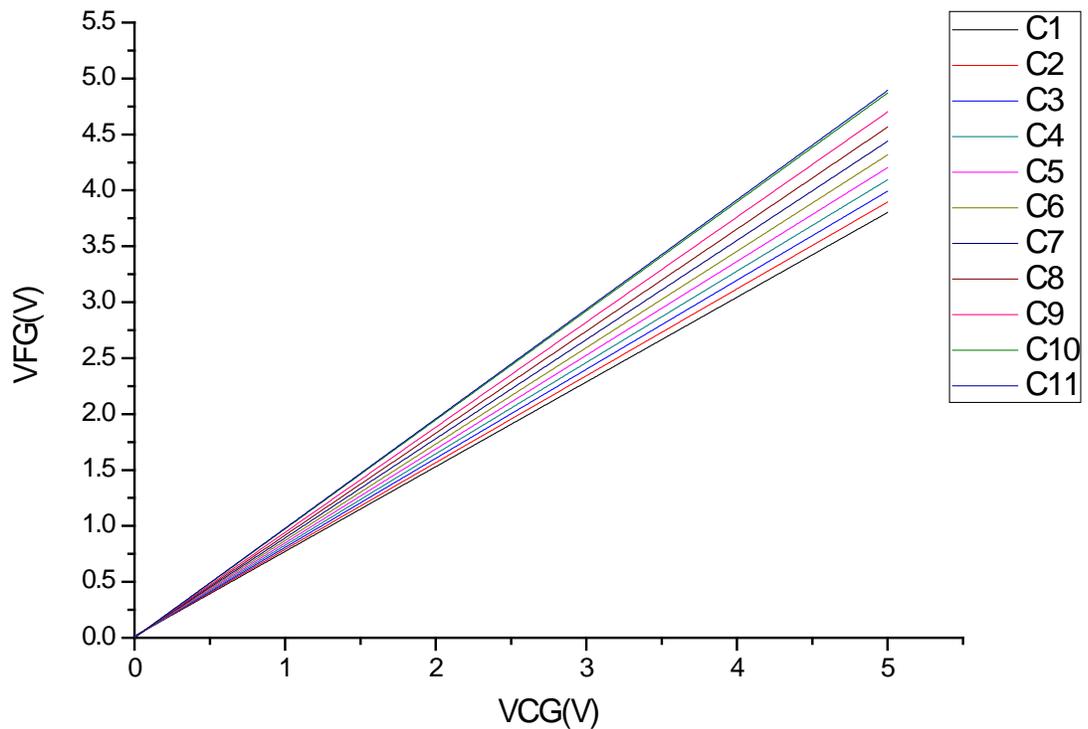


Figura 3.5.- Gráfico de V_{FG} vs V_{CG} empleando valores de capacitancia (C_{var}) mostrados en la Tabla 3.4.

En la figura 3.6 se puede ver que entre mayor sea el voltaje aplicado a la compuerta de control, se logra un mayor rango de variación de la corriente de drenador, lo cual ayuda a tener una mejor resolución del sensor. Entre mayor pendiente tenga la curva, mejor resolución de A/Pa (relación de la variación de corriente sobre la presión aplicada). Para el aspecto geométrico empleado ($W/L=$

$30\lambda/20\lambda$), se tiene que para un $V_{CG}=5V$, la corriente en reposo del sensor es de 23.48mA mientras que para una presión de 50KPa, la corriente tiene una magnitud de 30.37mA, lo que da una diferencia de 6.89mA, resultando en un rango bastante adecuado para enmascarar una posible contribución de ruido. Aún para menores voltajes de compuerta de control se tienen variaciones importantes de corriente. Por ejemplo, con $V_{CG}=4V$, la variación va desde 18.33mA hasta 24.22mA; con $V_{CG}=3V$, la variación es desde 12.9mA hasta 17.57mA y para $V_{CG}=2V$, este rango va desde 7.23mA hasta 10.46mA. Como se puede ver, la compuerta de control permite un grado de libertad para elegir diferentes rangos de corriente para un mismo rango de presiones. Vale la pena comentar que el límite superior de presión en este estudio, se estableció hasta los 50kPa, para evitar que la capacitancia creciera de manera desmedida, como se comentó anteriormente, con lo que no se podría observar adecuadamente la variación de corriente que se muestra en la figura 3.6. Consecuentemente, de manera práctica se deberá evitar sobrepasar esta presión límite para no dañar al sensor.

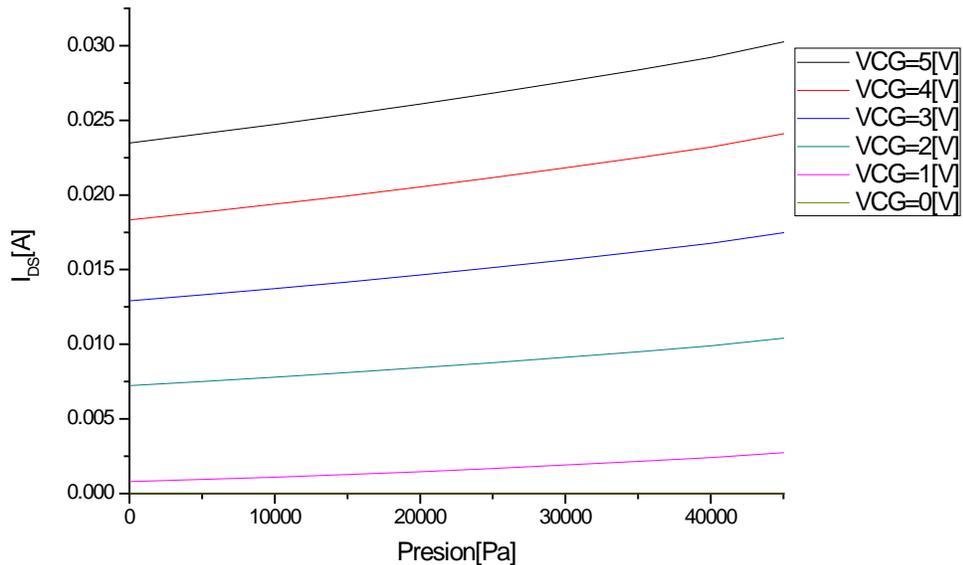


Figura 3.6.- I_{DS} del FGMOS vs presión aplicada con diferentes voltajes aplicados a la compuerta de control.

Otro aspecto importante respecto al principio de operación de FGMOS basado en un coeficiente de acoplamiento variable, es hacer una comparación de sus características I-V con respecto a un FGMOS al que se le inyecta/extrae carga. En la figura 3.7 se presenta, a partir de la figura 3.4, la variación de $I_{DS}^{1/2}$ en función del voltaje de compuerta de control, V_{CG} . Este es uno de los métodos tradicionales para extrapolar el voltaje de umbral de los transistores MOS. En esta gráfica se puede apreciar que si se extrapola una línea recta de la región lineal de cada característica, se tendrá un mismo voltaje de umbral para cada curva. Sin embargo, en la figura 3.8, se hizo la simulación del mismo FGMOS considerando la capacitancia en reposo del sensor de presión, pero considerando que se le inyecta carga negativa a la compuerta flotante. En esta figura también se grafica $I_{DS}^{1/2}$ en función del voltaje de compuerta de control, V_{CG} , y como se puede observar, la extrapolación para cada curva entrega un voltaje de umbral diferente, que para este análisis, se está aumentando su voltaje de umbral.

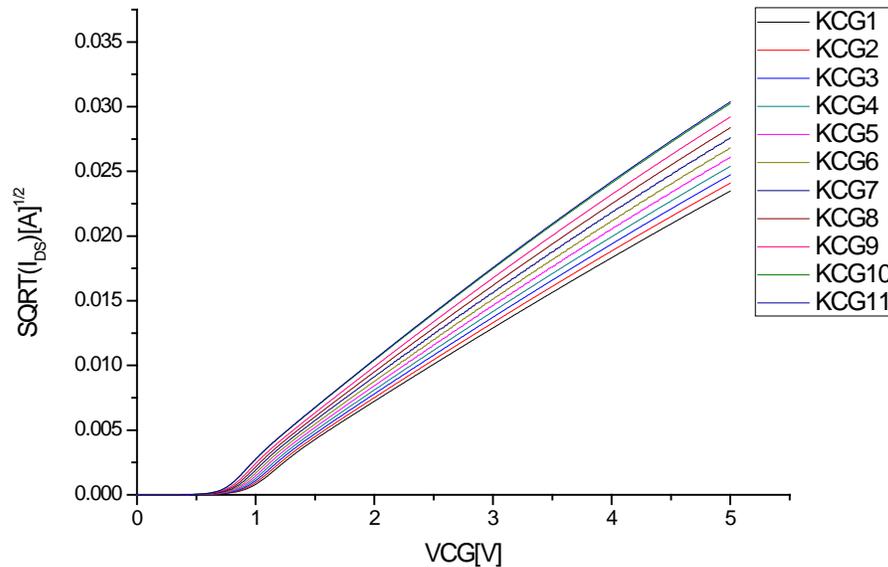


Figura 3.7.- Característica I-V de un FGMOS con capacitancia variable (coeficiente de acoplamiento variable).

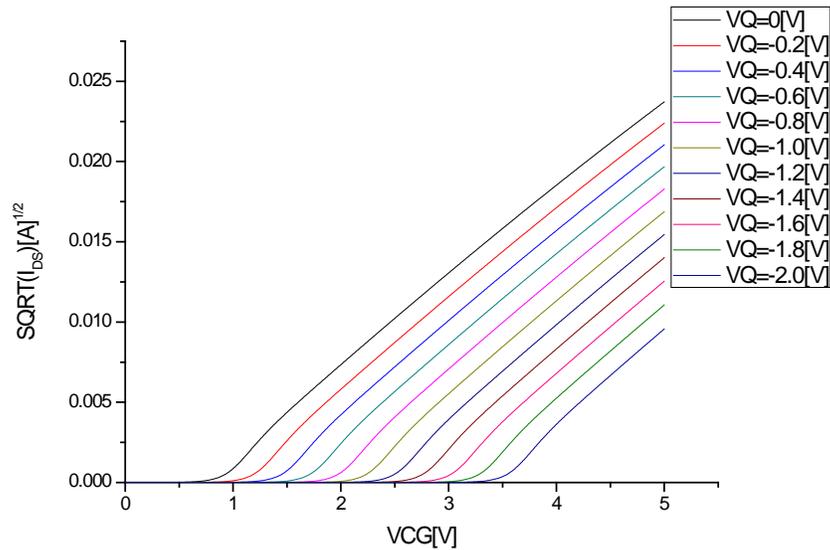


Figura 3.8.-Característica I-V de un FGMOS considerando una inyección de carga negativa en su compuerta flotante.

Por lo tanto, se demuestra que con este comportamiento simulado del FGMOS y considerando un coeficiente de acoplamiento variable correspondiente a la respuesta de la membrana del sensor de presión, se podría correlacionar el parámetro físico que se quiere medir con la corriente del transistor.

Es importante recalcar que tanto los cálculos obtenidos, así como la simulación de la parte eléctrica del sensor se realizaron para una membrana cuadrada, la cual se encuentra fija de sus cuatro lados. La estructura final del sensor contiene cuatro brazos que soportan la membrana. Debido a que es una nueva estructura presentada para sensores de presión no cuenta con alguna expresión analítica que permita determinar el desplazamiento y la capacitancia en función de la presión aplicada. Es por eso que el análisis de estos parámetros para la estructura final con diferentes tamaños de brazos se presentará, en el siguiente capítulo debido a que el software para análisis mediante elementos finitos, llamado COMSOL, sí permite obtener el valor de estos parámetros en función de la presión aplicada a partir de la estructura tridimensional considerada.

3.4. Estructura del sensor de presión.

En la figura 3.9 se muestra una sección transversal del diseño propuesto para el sensor de presión, tomando en cuenta la tecnología elegida y para una membrana cuadrada soportada por brazos en cada una de las esquinas.

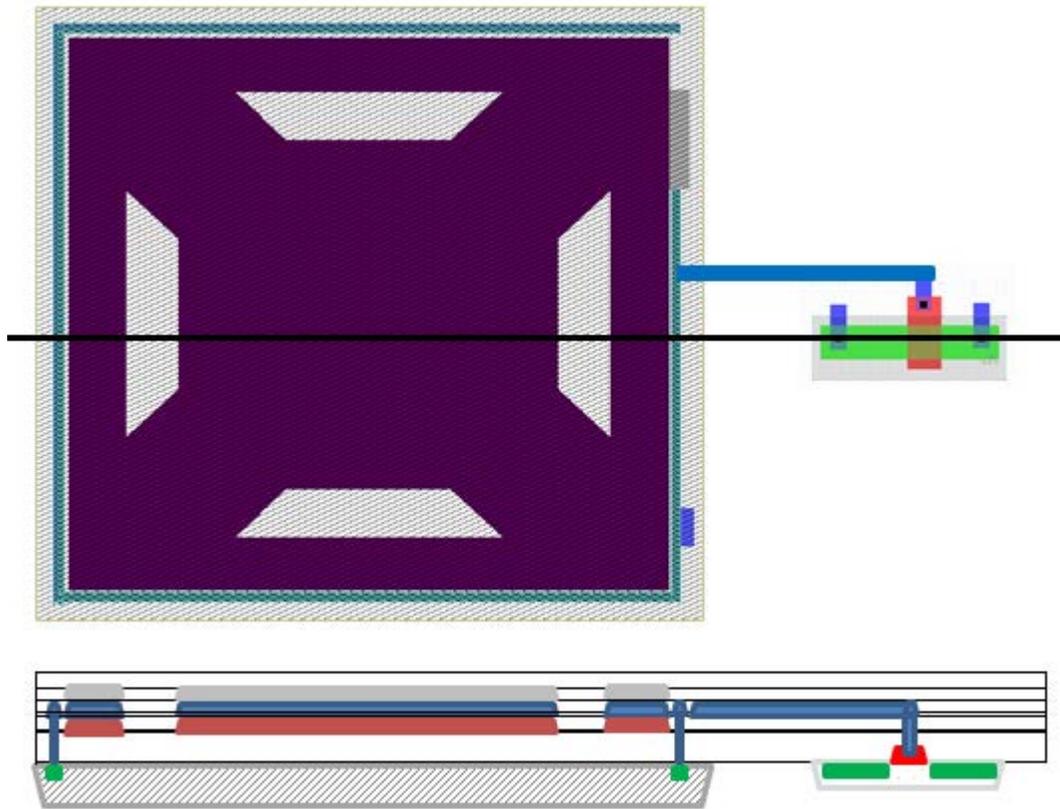


Figura 3.9.- Sección transversal del sensor de presión.

3.5 Conclusiones.

En este capítulo se presentó el diseño del sensor de presión con base a los parámetros tecnológicos de la tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$, pozo N, doble poly y doble metal. Se determinó el espesor de la membrana y la separación de los electrodos del capacitor que operará como membrana del sensor de presión a partir del modelo analítico de una membrana cuadrada anclada por sus cuatro lados. Posteriormente, se calcularon los valores de las capacitancias que se tendrían al ejercer presión sobre la membrana. Estos valores se introdujeron al modelo del FGMOS de coeficiente de acoplamiento variable y se obtuvieron sus características I-V, para posteriormente poder hacer la correlación de corriente del FGMOS en función de la presión sobre la membrana. Finalmente, se hizo una simulación para hacer una comparación de las características I-V de un FGMOS con coeficiente de acoplamiento variable y uno al cual se le inyecta carga negativa. Con el primero se conserva el voltaje de umbral, pero la corriente aumenta en función de un aumento del coeficiente de acoplamiento, mientras que para el segundo, considerando un K_{CG} constante pero con diferente carga sobre la compuerta flotante, se varía el voltaje de umbral. Este factor se debe tomar en cuenta al momento de decidir sobre el diseño del transistor y el uso que se le va a dar.

Simulaciones.

4.1 Introducción.

A partir de la propuesta del modelo que se presentó en el capítulo 3 y con ayuda del paquete para simulación y análisis por elementos finitos llamado COMSOL, se realizó el análisis de desplazamiento y capacitancia para las diferentes estructuras propuestas en el capítulo anterior y con esto poder verificar el funcionamiento del diseño.

Para comenzar, en la tabla 4.1 se enlistan los valores de los parámetros establecidos con anterioridad y calculados a partir de las expresiones analíticas disponibles para las geometrías consideradas y que intervienen en el diseño.

Parámetros.	
Forma de la membrana.	Cuadrada.
Espesor de la membrana.	2.15 μm .
Longitud de lados.	200 μm .
Separación entre placas.	0.8591 μm .
Área de las Placas.	40,000 μm^2
Dieléctrico.	Aire.
Constante dieléctrica del vacío	8.85 aF/ μm
Constante dieléctrica del SiO ₂ .	3.97x8.85 aF/ μm

Tabla 4. 1.- Parámetros empleados en el diseño del sensor.

Antes de mostrar los resultados obtenidos en las simulaciones, es importante destacar que los valores de capacitancia van a variar con respecto a los valores obtenidos de manera teórica; esto es porque el análisis teórico se realizó a partir de considerar un capacitor de placas paralelas por lo que el desplazamiento que se genera al aplicar la presión es uniforme, es decir, la placa se mueve completa sin sufrir alguna deformación. Pero en el caso de la

simulación, el análisis se presenta con una estructura tridimensional tal como las que se emplean en el diseño de MEMS. Es por ello que el valor de la capacitancia que se obtiene a partir de dicho análisis, se deriva al realizar una integración en el área de la membrana, debido a que el desplazamiento que se genera al aplicar la presión no es uniforme por efecto de que está anclada y en consecuencia se presenta una deformación en forma de curva, dicha integración se genera con la finalidad de considerar la capacitancia de manera infinitesimal en cada uno de los puntos de la membrana, tal como se muestra en la figura 4.1.



Figura 4. 1.- Integración de capacitancia para la membrana.

4.2 Análisis de desplazamiento y capacitancia por elemento finito con COMSOL.

4.2.1 Membrana cuadrada con sus cuatro lados anclados.

La estructura del primer modelo que se creó en COMSOL se muestra en la figura 4.2, donde se observa que la membrana está formada a partir de la unión de las capas de metal1, metal2 y poly2, las cuales están separadas del sustrato una distancia de $0.8591\mu\text{m}$ donde el dieléctrico es el aire. Para estas simulaciones se consideró que la estructura está fija en sus cuatro lados.

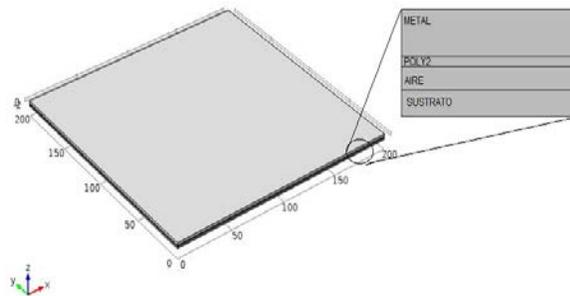


Figura 4. 2.- Diseño de la primera estructura simulada.

Los resultados de desplazamiento en la simulación se muestran en la figura 4.3, donde se observan diferentes colores en la superficie de la membrana, debido a que el desplazamiento no es uniforme y el desplazamiento máximo se presenta en el centro de ésta. En la figura se puede ver que la membrana se dibuja en el plano x-y y el desplazamiento debido a una presión de 60kpa se simula en el eje z. Para este caso, el valor obtenido para el desplazamiento máximo fue de $0.8567\mu\text{m}$, el cual se presenta precisamente al centro de la geometría. El signo del desplazamiento corresponde a que la dirección de la deformación es hacia el lado negativo del eje z.

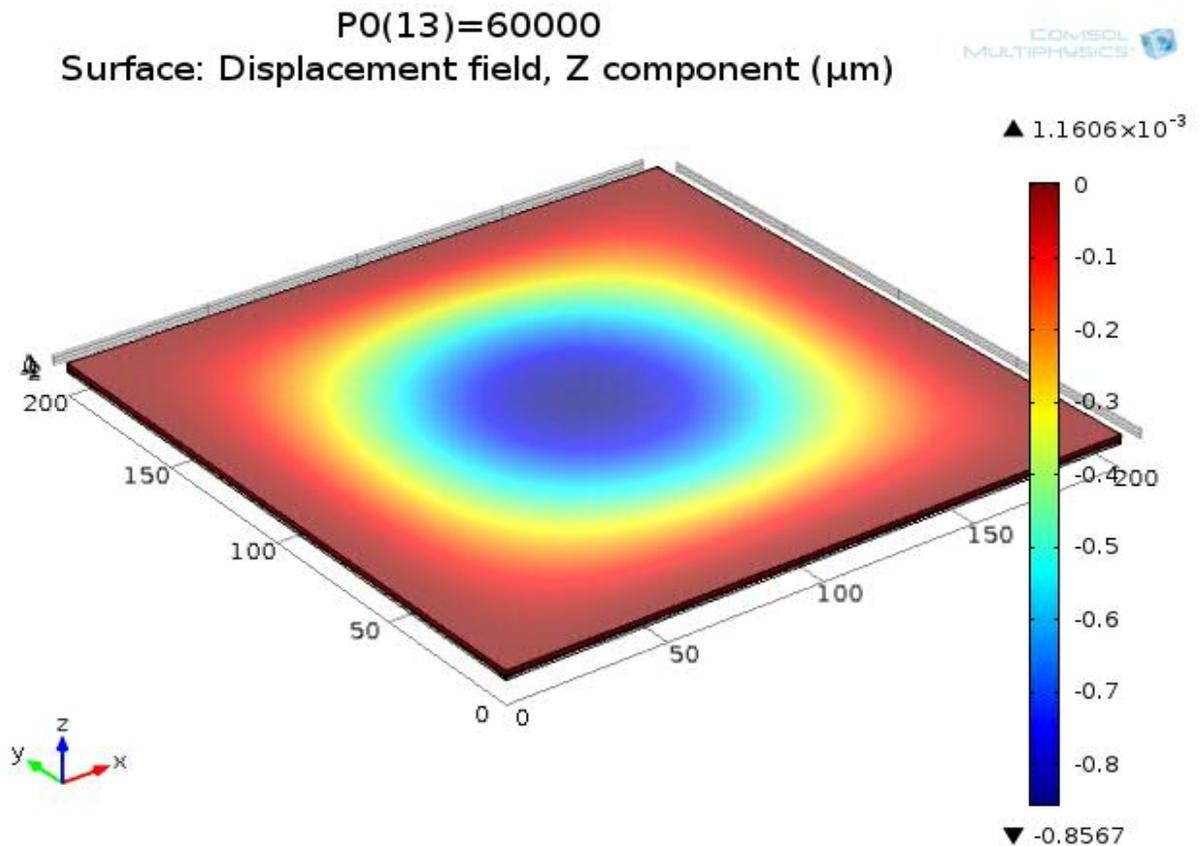


Figura 4. 3.- Comportamiento del desplazamiento en el área de la membrana al aplicarse una presión de 60kPa.

Por otro lado, en la figura 4.4 se muestra una sección transversal donde se ilustra la curvatura que se genera en la membrana al aplicar la presión tal como se había mencionado al inicio del capítulo y debido a que se consideró que los cuatro lados de la membrana están anclados. De aquí se puede ver que al no presentarse un desplazamiento uniforme por parte de la membrana, es necesario hacer una integración para obtener el valor global de la capacitancia, pues ésta es dependiente de la separación entre placas.

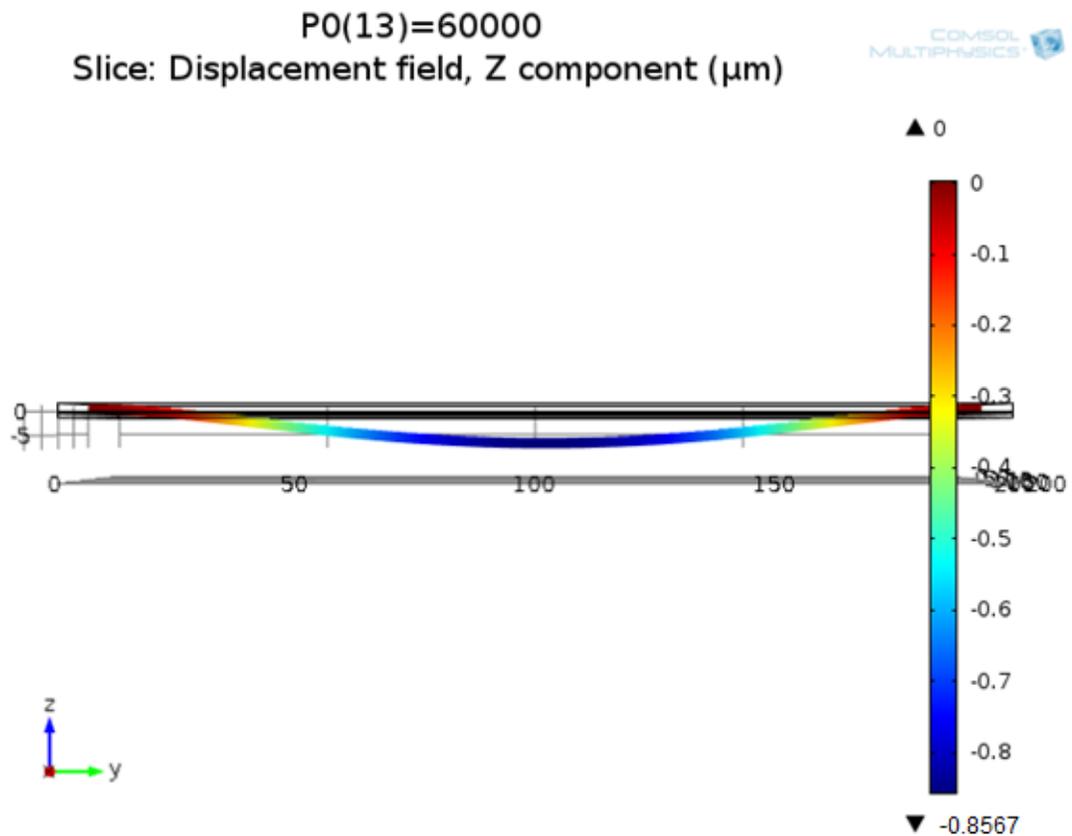


Figura 4. 4.- Deformación que sufre la membrana con la presión aplicada.

En la figura 4.5 se observa que el desplazamiento presenta un comportamiento lineal conforme incrementa la presión aplicada, considerando únicamente el desplazamiento al centro de la membrana. Como ya se mencionó,

de la simulación se obtuvo un desplazamiento máximo de $0.8567\mu\text{m}$ para una presión máxima de 60kPa , lo que representaría la presión límite para este diseño, ya que es importante que el desplazamiento máximo sea menor a la separación entre la membrana y el sustrato para evitar que las placas entren en contacto, por lo tanto como se mencionó en el capítulo anterior se consideró el valor de $0.8\mu\text{m}$ como desplazamiento máximo.

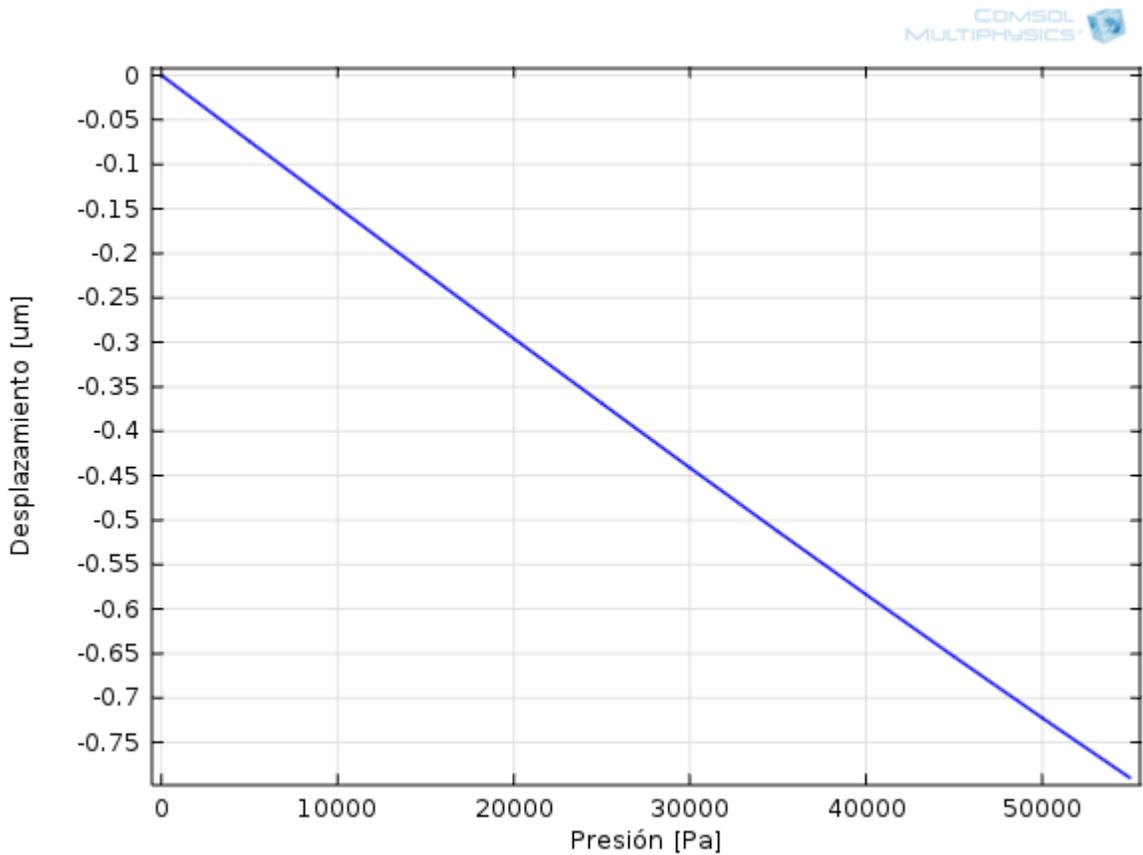


Figura 4. 5.- Comportamiento del desplazamiento en función de la presión aplicada.

La simulación correspondiente a la capacitancia para la misma estructura se muestra en la figura 4.6, donde se observa que el comportamiento de la capacitancia no es lineal y que es directamente proporcional a la presión aplicada. De igual manera la capacitancia máxima se presenta para la presión de 60kPa para la cual se obtuvo un valor de 1.42655×10^{-12} [F]. El valor de presión que

genera el desplazamiento máximo establecido ($0.8 \mu\text{m}$) es de 56kPa y a su vez se tiene un valor de capacitancia de $6.2979 \times 10^{-12} \text{ [F]}$.

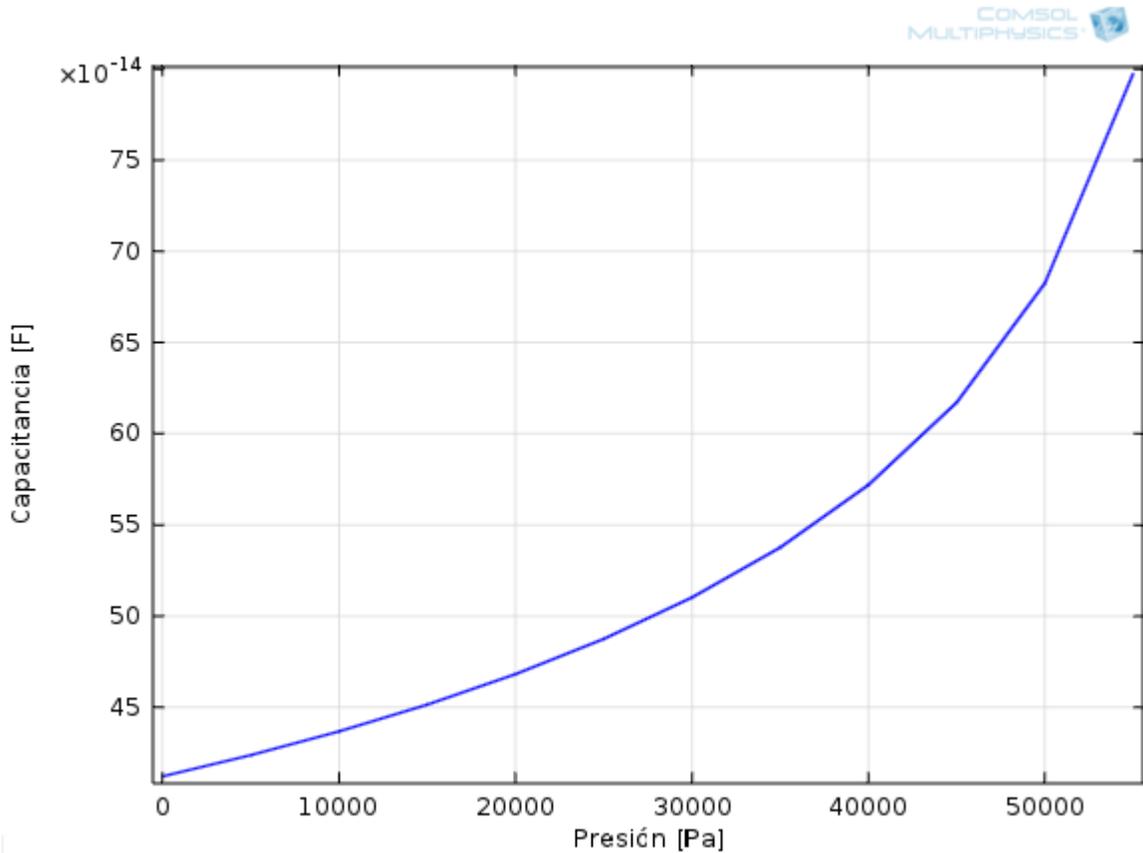


Figura 4. 6.- Comportamiento de capacitancia en función de la presión aplicada.

4.2.2 Membrana cuadrada sostenida por cuatro brazos.

El segundo modelo propuesto al que se le realizaron sus simulaciones en COMSOL se muestra en la figura 4.7 Este modelo está formado también a partir de una membrana cuadrada de $200\mu\text{m}$ por lado, pero la cual en este caso está sostenida por cuatro brazos, uno en cada una de las esquinas de la membrana; los brazos funcionan como soportes para la membrana y están sujetos en su extremo exterior. Por lo tanto, la diferencia de esta estructura con respecto a la analizada en el inciso 4.2.1, es que no está anclada completamente en sus cuatro lados, sino solo por sus esquinas, a través únicamente de brazos de anclaje.

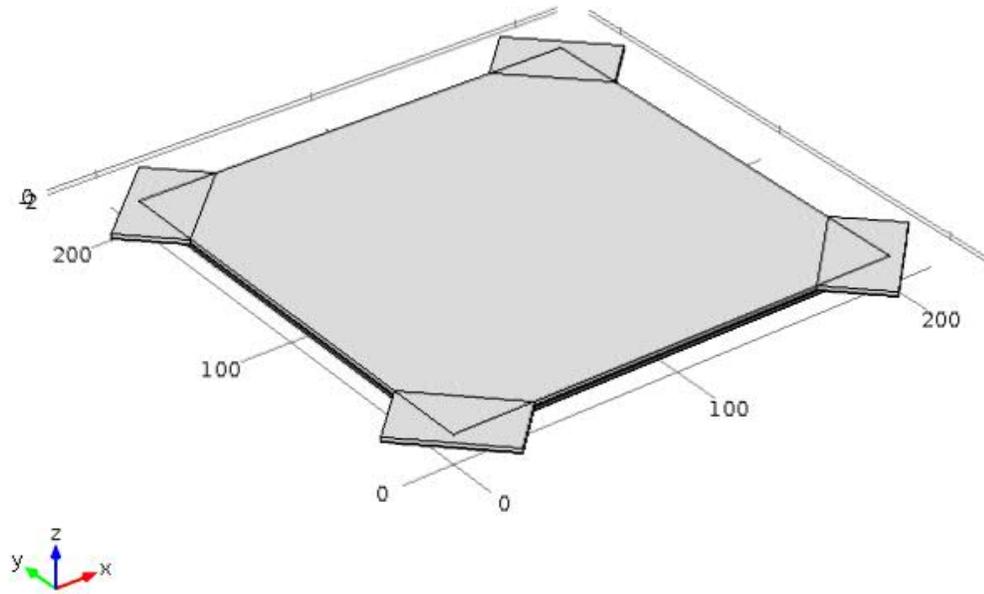


Figura 4. 7.- Modelo propuesto con brazos para soportar a la membrana.

Para este modelo solo se presentan cuatro alternativas, es decir, para diferentes dimensiones de brazos, ya que como se verá, el tamaño de los brazos juega un papel importante para determinar el rango de operación del sensor.

Caso 1. Brazos de $30\mu\text{m}$ de largo y $50\mu\text{m}$ de ancho.

En la figura 4.8 se muestran uno de los brazos para la primera propuesta con las siguientes dimensiones: $30\mu\text{m}$ de largo y $50\mu\text{m}$ de ancho; de igual manera que la membrana, los brazos están formados por las capas de metal1, metal2 y poly2 disponibles en la tecnología de $0.5\mu\text{m}$.

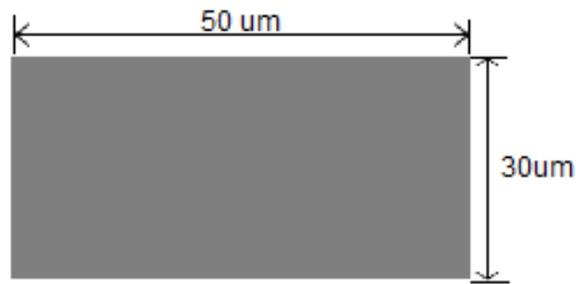


Figura 4. 8.- Forma y longitudes de los brazos.

La simulación del desplazamiento para esta alternativa se muestra en la figura 4.9, de la cual se obtuvo un desplazamiento máximo de $0.85578\mu\text{m}$ para una presión máxima de 8kPa.

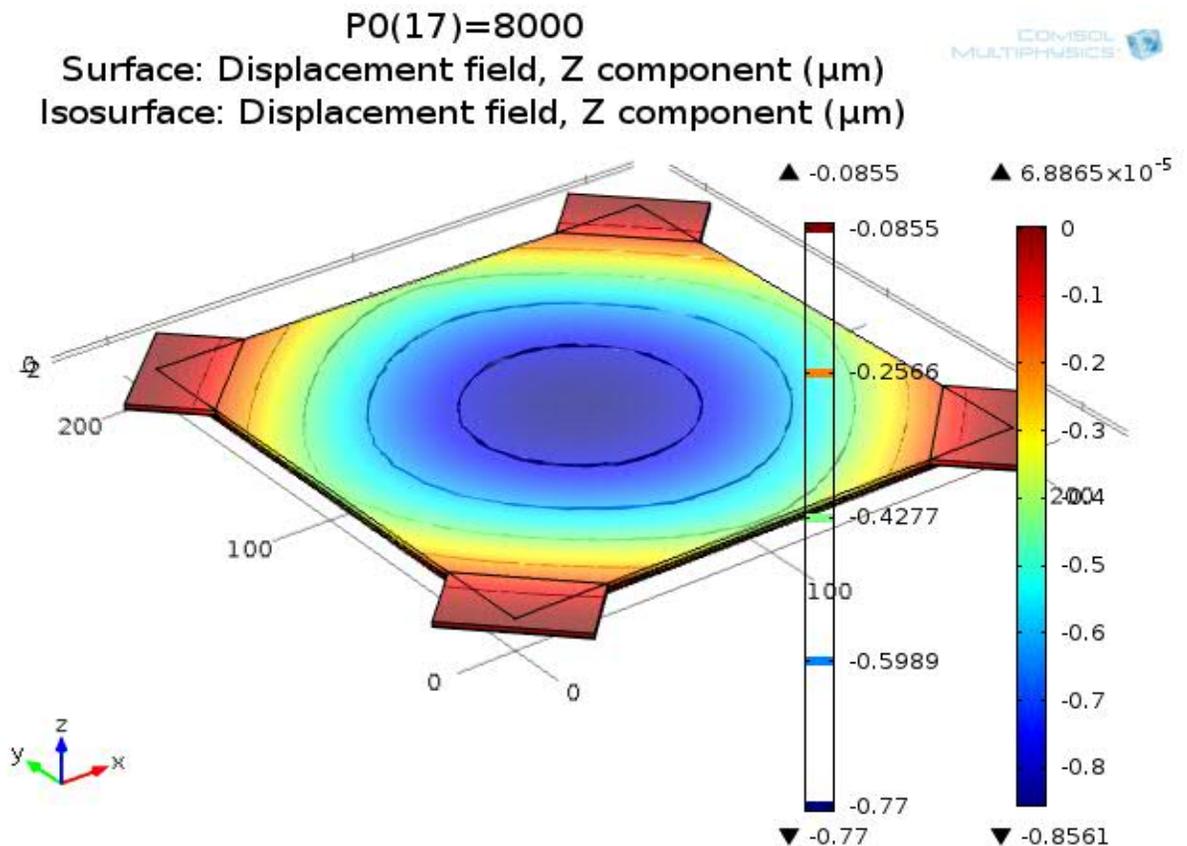


Figura 4. 9.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $30\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.

La simulación correspondiente para la capacitancia se muestra en la figura 4.10 donde se obtiene una capacitancia máxima de $2.94810 \times 10^{-12} [F]$ para el mismo valor de presión máxima aplicada.

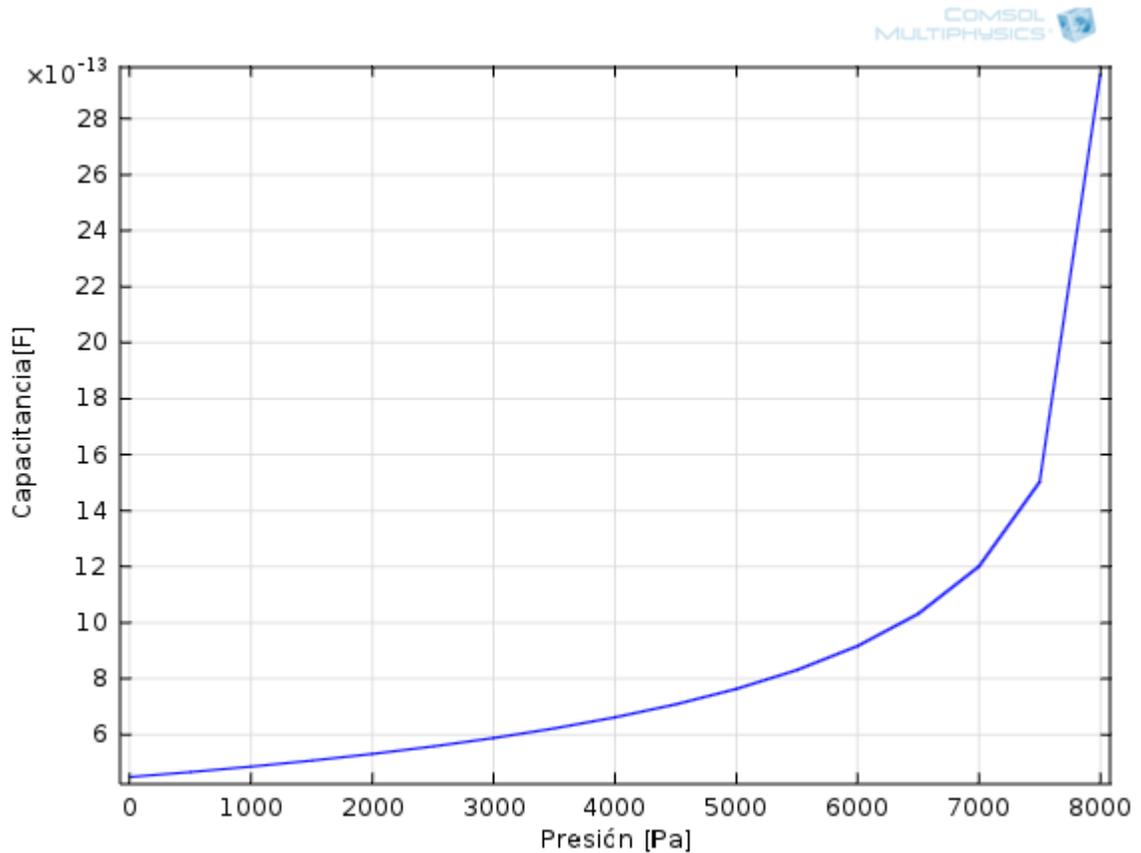


Figura 4. 10.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de $30\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.

De los resultados anteriores, se puede notar inmediatamente el efecto de anclar la membrana mediante brazos colocados a cada esquina de ella. A pesar de que la membrana tiene el mismo espesor de la primera membrana, se requirió menos presión (8kPa) para tener un desplazamiento máximo. Además, la capacitancia máxima es mayor como consecuencia del área extra que se tiene debido a cada brazo de $30\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ y sigue la misma tendencia que la geometría anterior.

Caso 2. Brazos de $40\mu\text{m}$ de largo y $80\mu\text{m}$ de ancho.

Para la segunda alternativa de esta geometría propuesta, se proponen brazos con las dimensiones de $40\mu\text{m}$ de largo y $80\mu\text{m}$ de ancho. En la figura 4.11 se observa que el desplazamiento máximo para este caso es de $0.84218\mu\text{m}$ para una presión máxima de 12kPa .

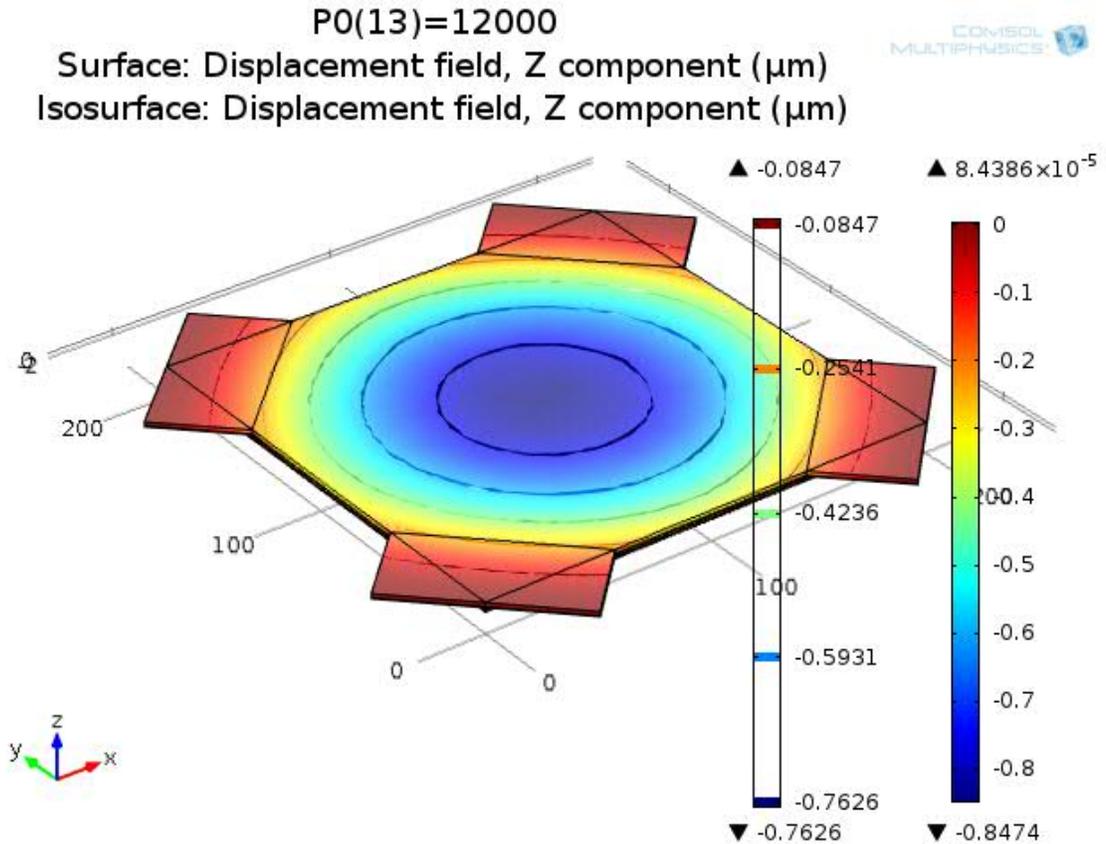


Figura 4. 11.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $40\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$.

En la figura 4.12 se observa el comportamiento de la capacitancia, donde se tiene que para la misma presión máxima el valor de la capacitancia máxima es de $3.3407 \times 10^{-12} [F]$.

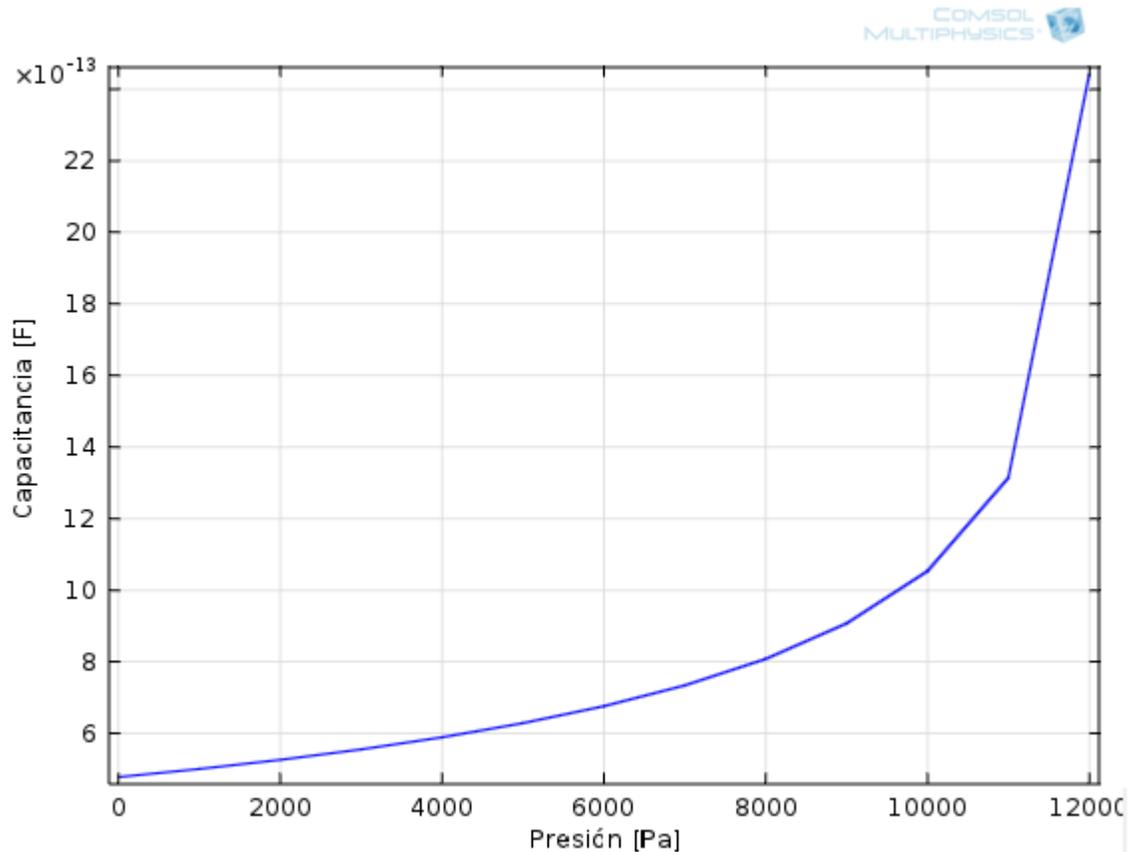


Figura 4. 12.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de 40µm x 80µm.

Se nota cómo la presión máxima requerida para tener un desplazamiento máximo al centro de la membrana, aumentó a 12kPa. Este aumento es de esperarse ya que en el límite superior del ancho del brazo, se cubriría completamente cada lado de la membrana y se tendería a los valores obtenidos en el inciso 4.2.1. Una ventaja que se tiene al agregar estos brazos de anclaje, es que la capacitancia aumenta y esto puede ayudar a enmascarar las capacitancias parásitas que se pueden llegar a presentar a intentar acoplar la membrana con el FGMS, como es el propósito de la presente propuesta.

Caso 3. Brazos de $50\mu\text{m}$ de largo y $100\mu\text{m}$ de ancho.

En la siguiente alternativa, las dimensiones de los brazos son de $50\mu\text{m}$ de largo por $100\mu\text{m}$ de ancho la cual se muestra en la figura 4.13, por lo que se obtiene un desplazamiento máximo de $0.79035\mu\text{m}$ para la presión máxima de 12kPa lo cual se observa en esta figura 4.13.

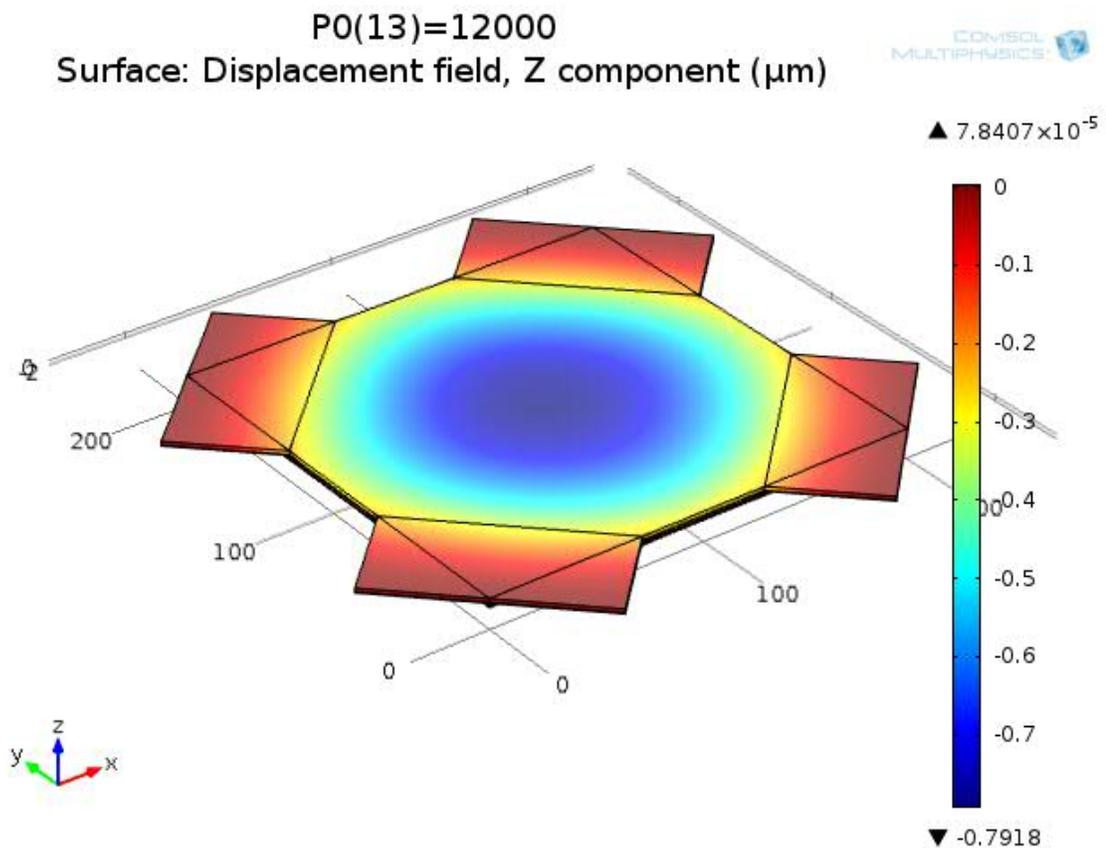


Figura 4. 13.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $50\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$.

En la figura 4.14 se observa que el valor de la capacitancia máxima es de $1.330 \times 10^{-12} [F]$ para el valor de la presión máxima.

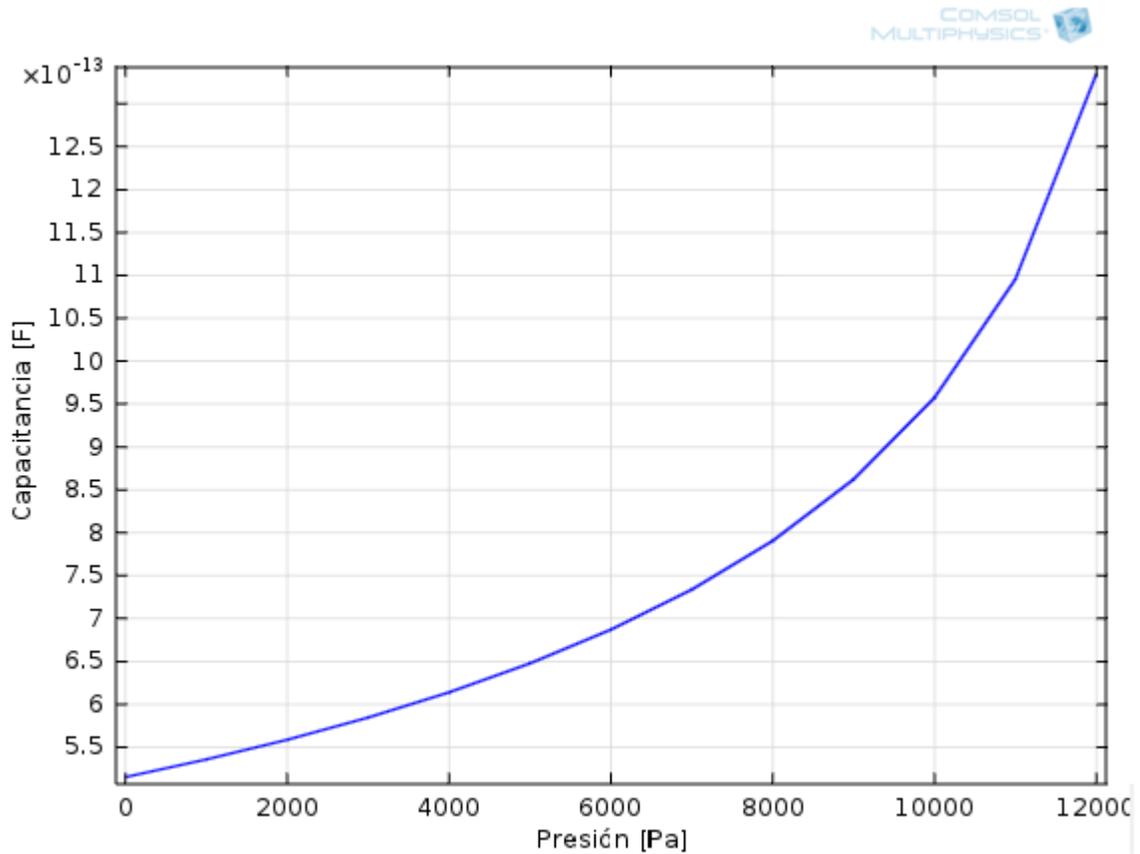


Figura 4. 14.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de 50µm x 100µm.

En este caso, el estudio se realizó para un desplazamiento máximo de la membrana menor al presentado en los casos 1 y 2, por lo que la integración de la capacitancia resultó en un menor valor de capacitancia. Sin embargo, la tendencia de requerir mayor presión para provocar la deformación de la membrana, se mantiene, conforme se había comentado anteriormente de acuerdo a lo establecido en el estudio de la membrana sostenida por sus cuatro lados

Caso 4. Brazos de $50\mu\text{m}$ de largo y $50\mu\text{m}$ de ancho.

En la figura 4.15 se muestra el comportamiento del desplazamiento para la alternativa número cuatro, donde las dimensiones de los brazos son de $50\mu\text{m}$ de largo por $50\mu\text{m}$ de ancho. Esta alternativa presenta un desplazamiento máximo de $0.79275\mu\text{m}$ para una presión máxima de 4.5kPa la cual se observa en la figura 4.15.

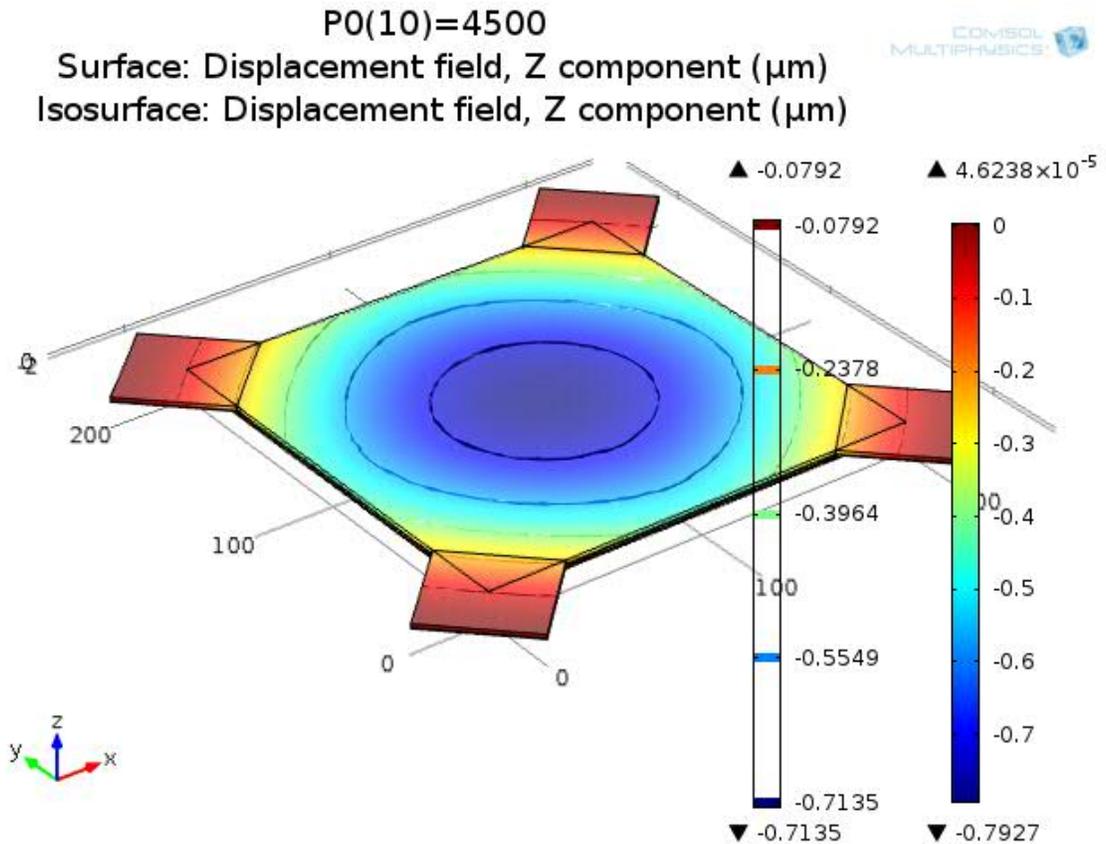


Figura 4. 15.- Comportamiento del desplazamiento para la estructura con brazos de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.

La simulación del comportamiento de la capacitancia se observa en la figura 4.16 de la cual se obtiene un valor de capacitancia máxima de $1.5164 \times 10^{-12} [F]$ para la presión máxima.

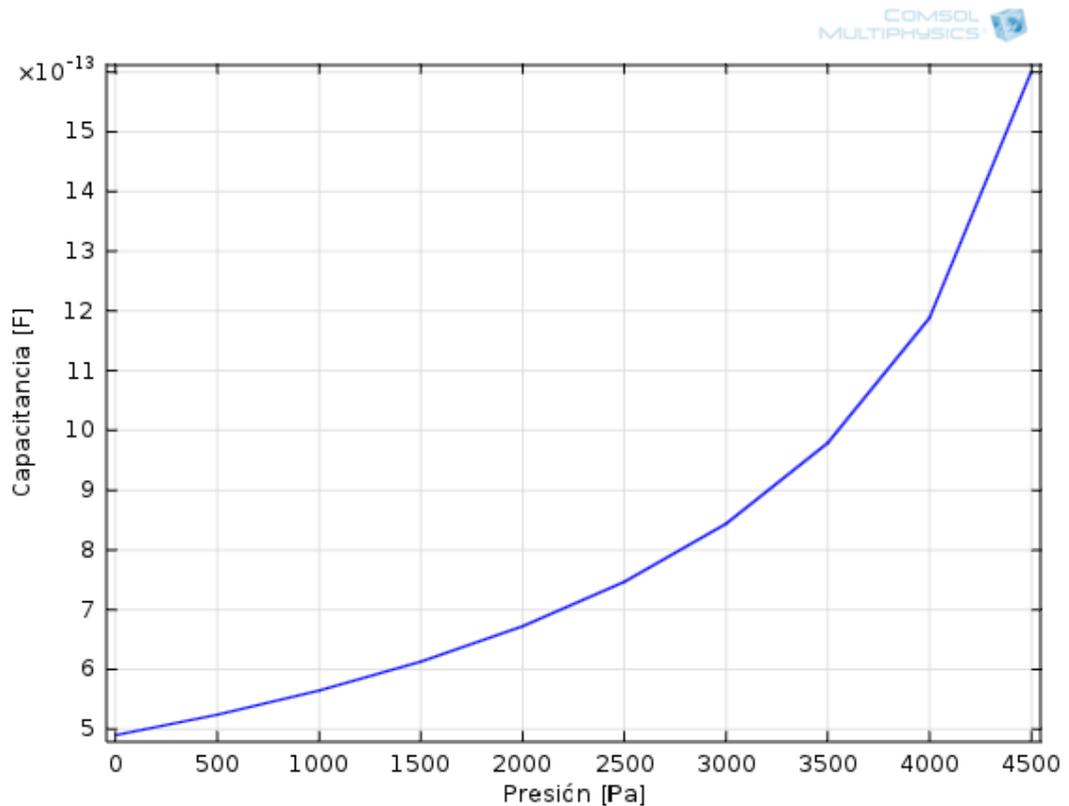


Figura 4. 16.- Comportamiento de capacitancia para la estructura con brazos de 50 μ m x 50 μ m.

Vale la pena hacer notar que este último estudio sugiere que el largo del brazo también influye en el desempeño de la membrana, ya que el resultado obtenido para el caso 4, muestra que la membrana tendrá mayor libertad de deformación, para un mismo espesor, requiriendo menor presión para llegar a un desplazamiento máximo.

En el resumen presentado en la tabla 4.2 se realiza una comparación de los diferentes valores de desplazamiento, capacitancia y el rango de presión que manejan las cuatro propuestas, de lo cual se concluye que los brazos tienen un papel importante para determinar el rango de presión en el que opera el sensor debido a que al incrementar las dimensiones de los brazos el rango de presión aumenta pero a diferencia de la propuesta sin brazos el rango de presión que se manejan disminuyen considerablemente.

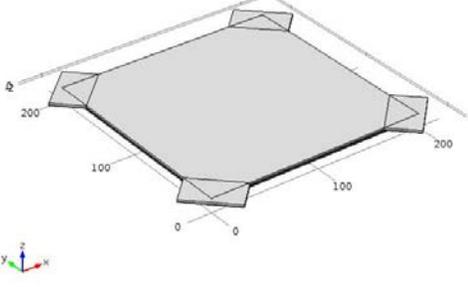
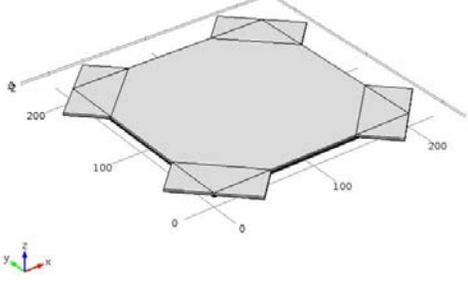
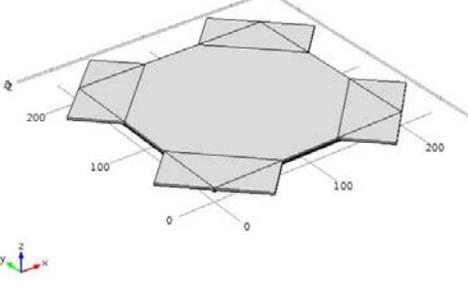
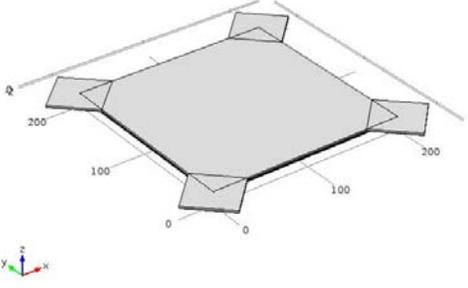
Estructura	Dimen. Del Brazo. [μm x μm]	Desplaz. Max. [μm]	Cap. Max. [pF]	Rango de Presión. [Pa]
	30 X 50	0.85578	2.948.	0-8k
	40 X 80	0.84218	3.340	0-12k
	50 X 100	0.79035	1.330	0-12k
	50 X 50	0.79275	1.516	0-4.5k

Tabla 4. 2.- Comparación de los parámetros de desplazamiento, capacitancia y presión para los cuatro modelos propuestos

4.3 Respuesta del Prototipo del Sensor de Presión.

De la tabla anterior se escoge la propuesta número dos ya que es la que nos permite manejar un rango de presión más amplio. Con ayuda de Orcad Pspice se realizarán las simulaciones eléctricas para obtener los valores de corriente y el voltaje de la compuerta flotante del sensor tal como se realizó para los valores teóricos obtenidos en el capítulo anterior. De igual manera, se utilizan los archivos que se muestran en los Apéndices A y B, que son los que se emplearon anteriormente.

A continuación se presenta la tabla 4.3, donde se muestra el rango de capacitancias que maneja el sensor para el rango de presión en el que opera el sensor de presión.

Presión [Pa]	Capacitancia Con Brazos[F]
0	4.78216E-13
1000	5.01044E-13
2000	5.26817E-13
3000	5.56393E-13
4000	5.90644E-13
5000	6.30916E-13
6000	6.79215E-13
7000	7.38723E-13
8000	8.14904E-13
9000	9.18310E-13
10000	1.07355E-12
11000	1.36421E-12
12000	3.34078E-12

Tabla 4. 3.- Parámetros de capacitancia para el modelo seleccionado.

Estos valores de capacitancia son los que se ingresan en la simulación de Pspice para obtener los valores de corriente para cada presión aplicada, el tamaño del transistor que se emplea es de $W=9\mu\text{m}$ y $L=6\mu\text{m}$ ($30\lambda/20\lambda$).

En la figura 4.17 se observa la gráfica de corriente I_{DS} en función del voltaje de la compuerta de control V_{CG} . Se observa que a medida que se incrementa el voltaje, el valor de la corriente se incrementa. En el extremo superior se tiene $0.892\ \mu\text{A}$ para la presión máxima de 12[kPa] .

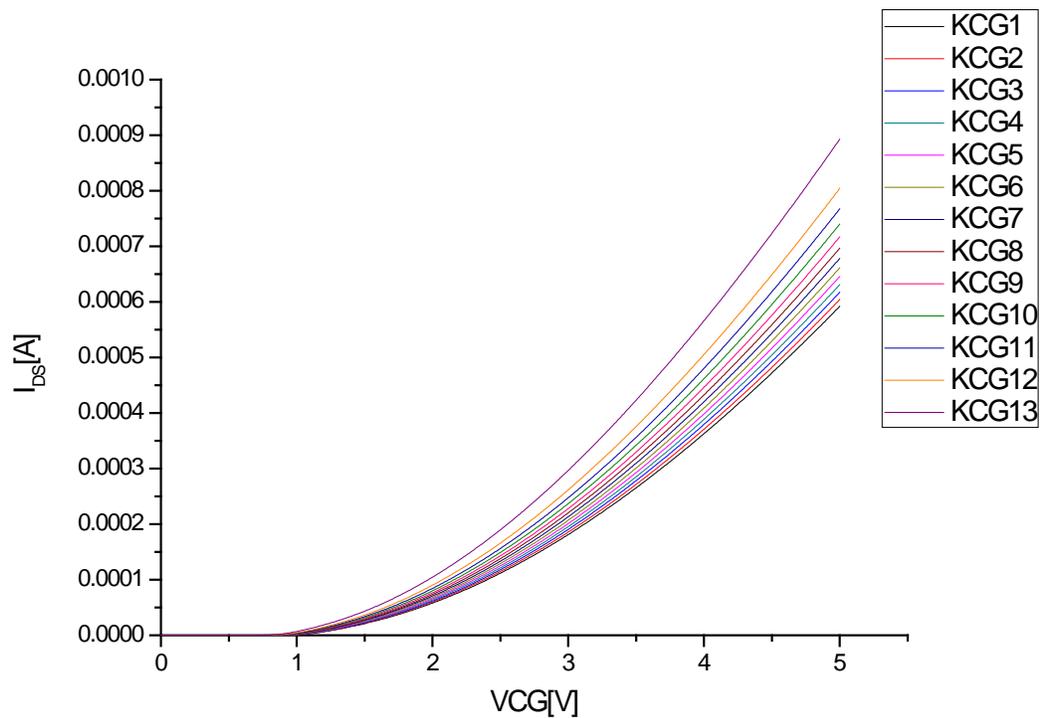


Figura 4. 17.- Comportamiento de la corriente I_{DS} en función del voltaje de compuerta V_{CG} .

En la figura 4.18 se muestra el comportamiento que presenta el voltaje de compuerta flotante V_{FG} , donde se observa que al incrementar la presión aplicada sobre la membrana, el voltaje se incrementa como se anticipó en el capítulo 3. Para la presión máxima se tiene un voltaje de compuerta flotante de $4.8124\ \text{[V]}$.

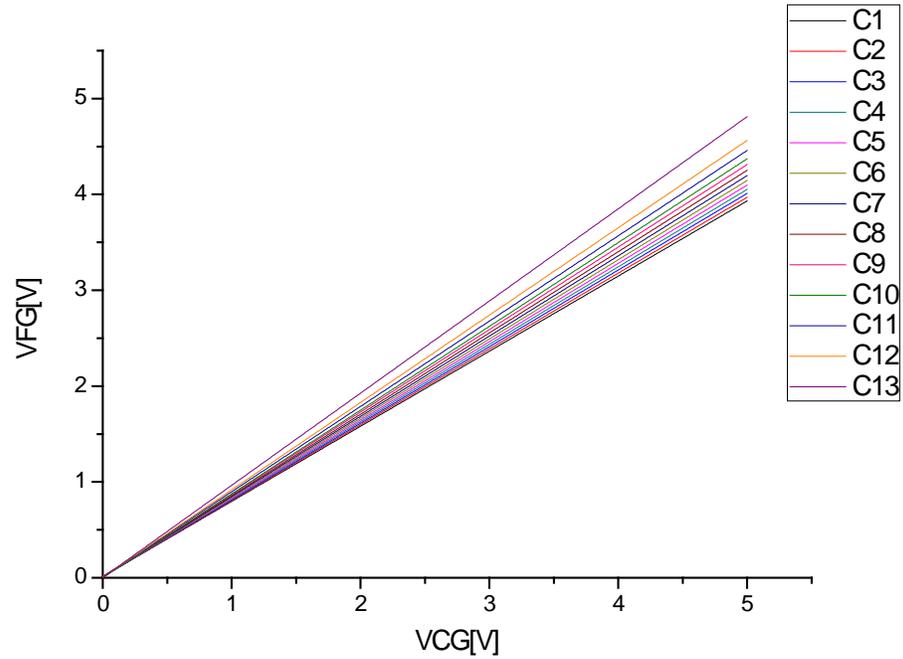


Figura 4. 18.- Comportamiento del voltaje de compuerta flotante V_{FG} en función del voltaje de compuerta de control V_{CG} .

Las simulaciones presentadas para la primera propuestas se realizaron para los prototipos restantes. En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

Dimen. Del Brazo. [$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	I_{DS} Max. [A]	V_{CF} Max. [V]	K_{CG} Max.
30 X 50	822×10^{-6}	4.6172	0.9234
40 X 80	892×10^{-6}	4.8124	0.96.24
50 X 50	831×10^{-6}	4.6415	0.9283
50X 100	800×10^{-6}	4.5545	0.9109

Tabla 4. 4.- Valores obtenidos para todos los prototipos.

4.4 Circuito de Lectura.

Una vez obtenidos los valores de corriente que entrega el sensor es necesario copiar esta corriente con un espejo de corriente con transistores tipo P como se muestra en la figura 4.19.

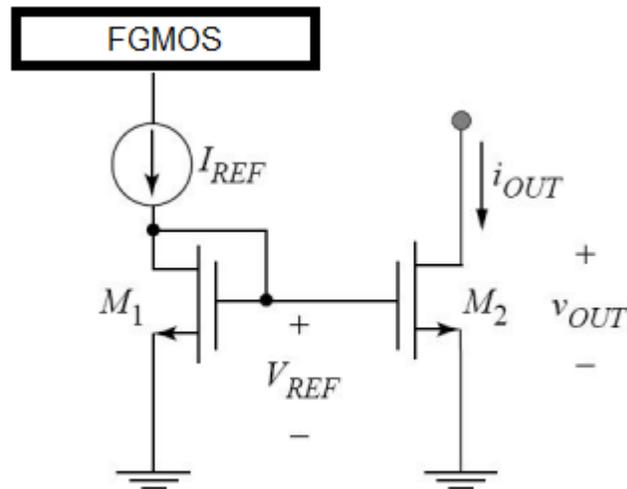


Figura 4. 19.- Configuración espejo de corriente para la lectura de la presión.

Se realizó la simulación en Pspice del circuito anterior como se muestra en el Apéndice E, el cual tiene la función de copiar la corriente que entrega el FG MOS para cada cambio de capacitancia que se genera al aplicar presión en el sensor. En la figura 4.20 se muestran las corrientes de salida que entrega el espejo de corriente para las diferentes capacitancias de la tabla 4.3 para un voltaje de control V_{CG} fijo con un valor de 5[V]. De la figura se observa que conforme se incrementa la capacitancia, la corriente de salida también se incrementa. Este análisis se realizó para diferentes valores del voltaje de control aplicado, de los cual se concluye que conforme se incrementa el voltaje de control aplicado, la corriente de salida se incrementa.

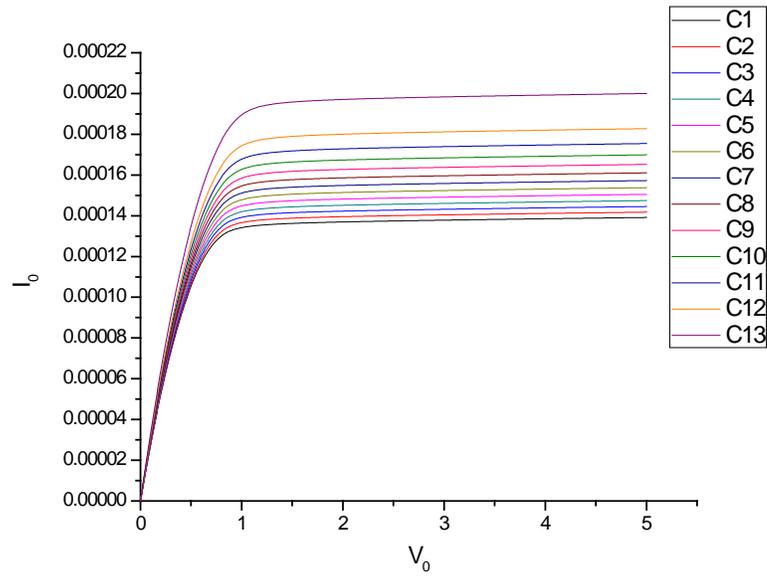


Figura 4. 20.- Corriente de salida del espejo de corriente.

En la figura 4.21 se muestra el incremento que presenta la corriente I_{DS} para diferentes valores del voltaje de control aplicado en función de la presión aplicada, lo cual nos lleva a concluir lo mismo de la figura anterior.

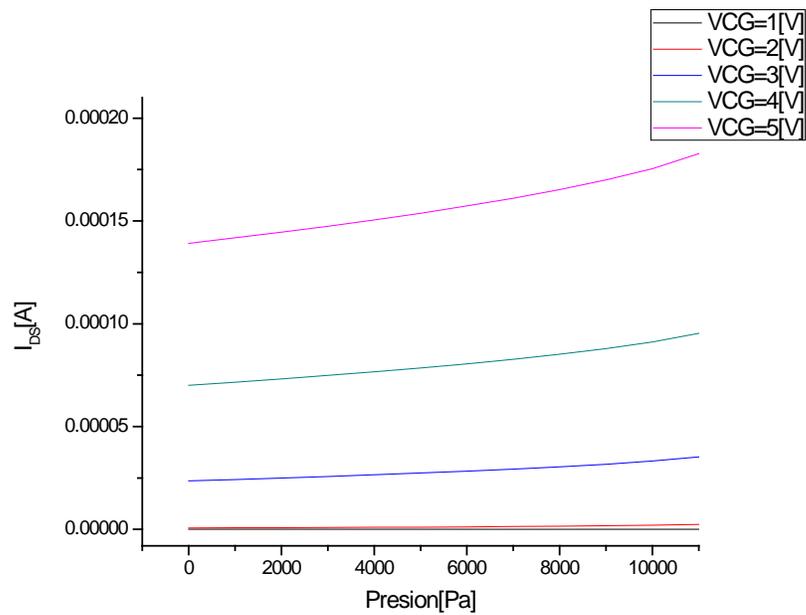


Figura 4. 21.- Corriente I_{DS} para diferentes V_{CG} aplicado.

Por último se toma la corriente de salida del espejo y se realiza una conversión de la corriente a voltaje, empleando un amplificador operacional en la configuración convertidor de corriente-voltaje como se muestra en la figura 4.22.

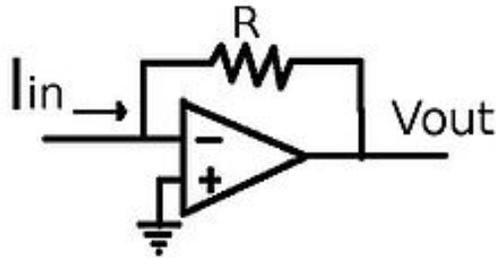


Figura 4. 22.- Convertidor corriente-voltaje.

La corriente de entrada en el convertidor es la que proporciona la salida del espejo de corriente. Para el cálculo de la resistencia R se hace a partir de la siguiente expresión:

$$V_{out} = -R \cdot I_{in} \quad (4.1)$$

El voltaje máximo de salida del circuito de lectura es de 5[V] y la corriente de entrada es la corriente máxima que entrega el sensor, por lo que el valor de la resistencia es de:

$$R = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{5[V]}{892 \times 10^{-6}[A]} = 5.599 K\Omega \approx 5.6 K\Omega$$

En la tabla 4.5 se muestra el valor de la resistencia y el voltaje de salida máximo que tiene cada una de las propuestas presentadas anteriormente.

Dimen. Del Brazo. [$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	I_{DS} Max. [A]	R[kΩ]	V_{OUT}[V]
30 X 50	9.59013x10-4	6.075	4.99
40 X80	1.02080x10-3	5.599	5.00
50 X 50	9.68913x10-4	6.012	4.99
50X 100	9.42932x10-4	6.243	4.99

Tabla 4. 5.- Valores del circuito de lectura para todas las propuestas.

La tabla 4.6 muestra los valores de salida que entrega la propuesta número dos para los diferentes valores de capacitancia con un voltaje de compuerta de control $V_{CG}=5[V]$.

Capacitancia [F]	I_o [A]	V_{out}[V]
4.78216E-13	0.00059208	3.315667
5.01044E-13	0.00060438	3.3845370
5.26817E-13	0.00061685	3.4543612
5.56393E-13	0.00063111	3.5342048
5.90644E-13	0.00064576	3.6162607
6.30916E-13	0.00066143	3.7040106
6.79215E-13	0.00067831	3.7985350
7.38723E-13	0.00069669	3.9014574
8.14904E-13	0.00071703	4.0153648
9.18310E-13	0.00074014	4.1447995
1.07355E-12	0.00076769	4.2990875
1.36421E-12	0.00080438	4.5045168
3.34078E-12	0.00089298	5.0006630

Tabla 4. 6.- Voltajes de salida en función de la corriente de entrada.

En la figura 4.23 se muestra la variación del voltaje en función de la presión aplicada. De igual manera el voltaje de salida incrementa en la medida que la presión aplicada se incrementa.

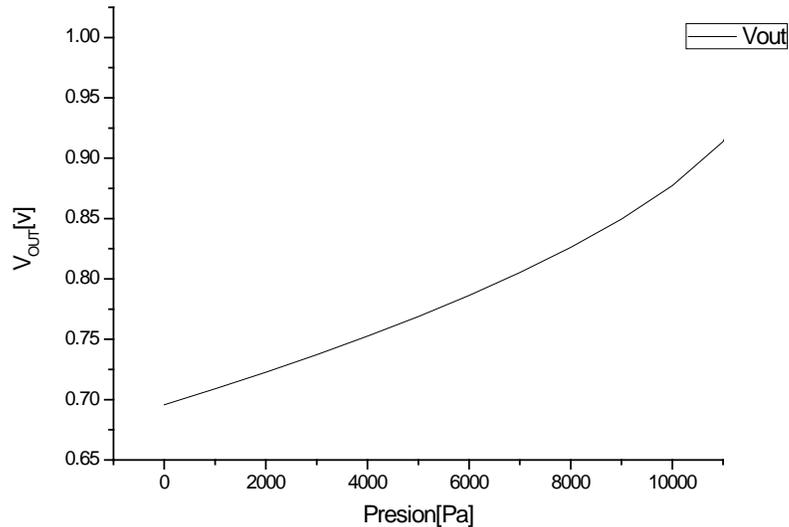


Figura 4. 23.- Gráfico Voltaje de salida vs Presión aplicada.

4.5 Conclusiones.

En este capítulo se presentaron las simulaciones de desplazamiento y capacitancia realizadas en COMSOL para los diferentes diseños de sensor de presión propuestos con base a los parámetros tecnológicos de CMOS de 0.5 μ m, pozo N, doble poly y doble metal. Se determinó que el tamaño de los brazos que se colocan en cada una de las esquinas de la membrana cuadrada del sensor juega un papel muy importante para determinar el rango de presión en el que puede operar dicho sensor. Finalmente, se propuso un circuito de lectura basado en un espejo de corriente, en el cual el FGMOS establece la corriente que pasaría por el espejo, en función de la corriente derivada por la presión aplicada en la membrana. Acoplando este espejo de corriente a un circuito convertidor corriente a voltaje, permite tener la correlación de voltaje-presión del sensor.

Diseño Topológico.

5.1 Introducción.

En este capítulo, se presenta el proceso de diseño de la membrana, basado en la tecnología de On Semiconductor de 0.5 μm , pozo N, doble polisilicio, doble metal, disponible a través de MOSIS (Proceso C5N). Se describirán los diferentes bloques que comprende el sistema del sensor junto con la electrónica de lectura, teniendo en mente un procedimiento CMOS-MEMS.

A partir del programa L-Edit se realizó el diseño topológico del sensor de presión propuesto en el capítulo anterior incluyendo la parte eléctrica para generar la transducción del sensor. El layout se generó respetando las reglas de diseño que proporciona la tecnología. A continuación se describirá cada una de las partes que conforman el prototipo [22].

5.2 Diseño de la estructura mecánica.

En la figura 5.1 se muestra el diseño topológico de la estructura de la membrana, que incluye los brazos en cada una de las esquinas de la misma, según se propuso en el capítulo anterior. Estos elementos constan de las capas de poly2, metal 1 y metal2. Alrededor de la estructura se observa un marco el cual se dibujó de poly1, poly2, metal1 y metal2, cuya función será como ancla de la membrana después de realizado el micromaquinado. También se tiene una especie de anillo de guarda que rodea a la estructura, formado por una implantación N+. La función del anillo es generar el contacto óhmico de la placa inferior del capacitor que se forma con la membrana y el substrato, que para este caso es el pozo N.

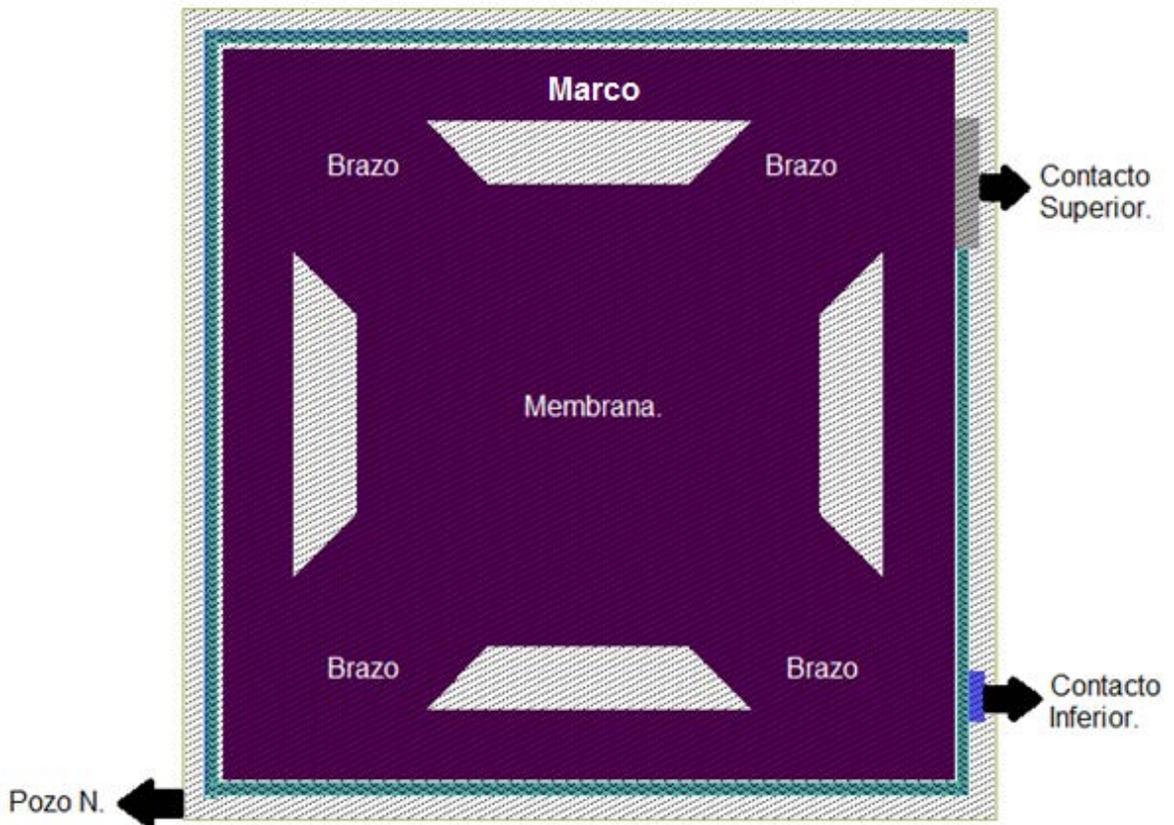


Figura 5. 1.-Diseño topológico del sensor de presión.

La estructura de la membrana se coloca por encima de un pozo N, siendo este último la placa inferior del capacitor variable. Los rombos que se aprecian a los cuatro lados de la membrana cuadrangular, son “ventanas” que indican las zonas donde el silicio del sustrato queda expuesto para poder realizar un micromaquinado superficial alrededor de la membrana.

También es importante mencionar que este micromaquinado es parte del post-proceso necesario para liberar a la membrana del sensor, por lo que se deberá tener la precaución de proteger las capas estructurales al momento de atacar la capa de sacrificio. En este caso, las capas estructurales son la capa de poly2 y las dos capas de metal que forman la membrana; a su vez, las capas de

sacrificio son la de poly1 y la de óxido de silicio que se encuentra entre la membrana y el sustrato. Con el objetivo de proteger contra el ataque del poly1 y el óxido de silicio que forman parte del marco cuya función es como ancla, se requiere una mascarilla extra (esto fuera del proceso CMOS de fabricación del chip) que enmascare el perímetro exterior de las ventanas impidiendo el paso del decapante hacia las anclas. Esta mascarilla se muestra en la figura 5.2, sobrepuesta sobre el marco mencionado anteriormente.

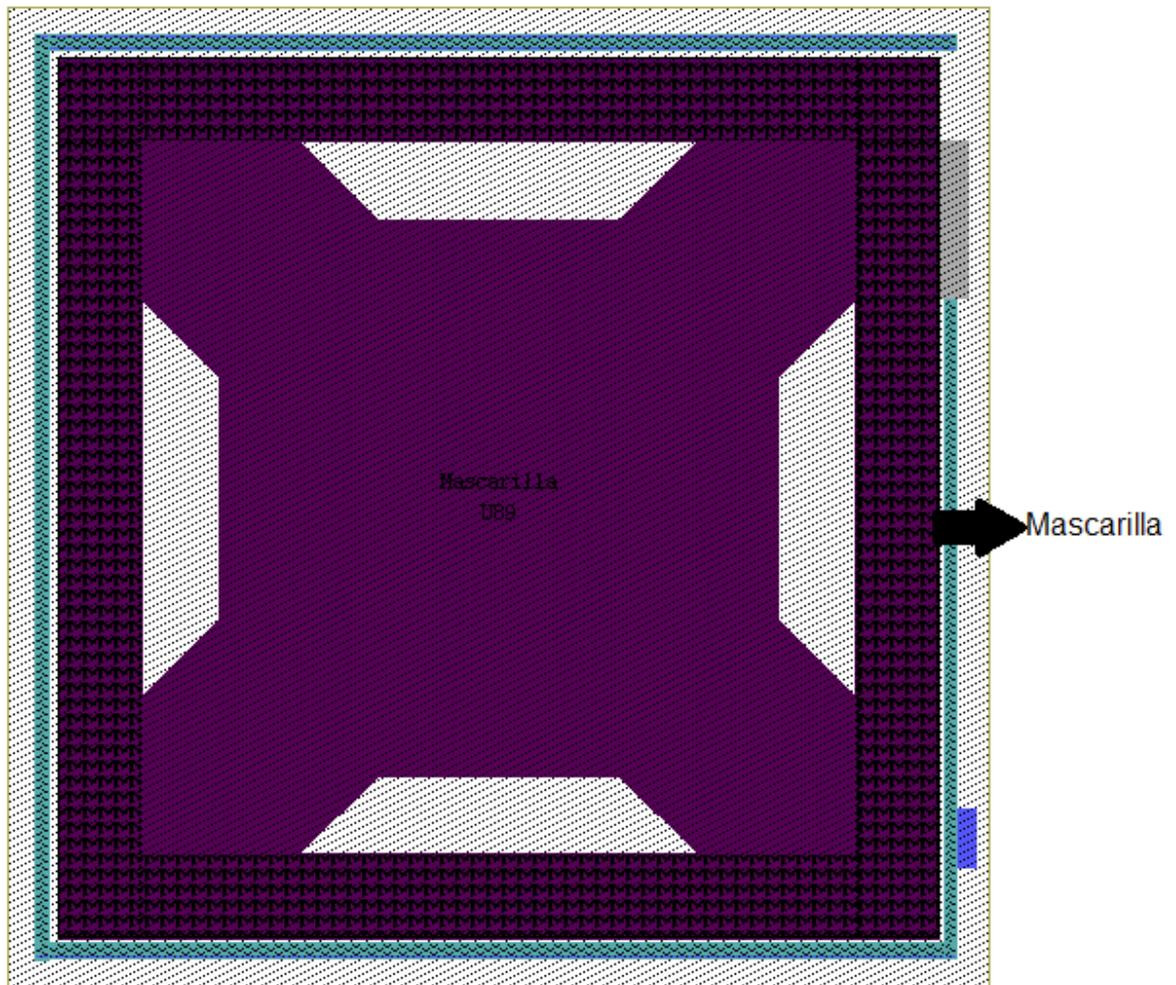


Figura 5. 2.-Mascarilla para evitar que el decapante elimine el poly1 en esta región.

Como ya se mencionó, la membrana estará formada por poly2, metal1 y metal2, pero se requiere que estas tres capas estén bien adheridas entre sí para

que funcione como una capa compacta al momento del desplazamiento cuando se aplique una presión. Para lograr esto, toda el área de la membrana tiene dos tipos de contactos, que están disponibles en la tecnología C5N, donde el primero es el contacto entre poly2-metal1 llamado, Poly2 Contact, y el segundo es el contacto que se genera entre metal1-metal2 llamado Via1.

En la figura 5.3 se muestra un acercamiento del marco y del anillo de una parte de la membrana del sensor, además de que se presenta una vista de la sección transversal donde observan los detalles de la creación del pozo N, además de las capas que constituyen la membrana, así como el contacto inferior del capacitor extraído a partir del pozo N.



Figura 5. 3.- Sección transversal del sensor de presión.

5.3 Diseño del transistor NMOS.

Ya se ha comentado que la membrana formará parte del capacitor variable con el que se consiga un coeficiente de acoplamiento variable aplicado al concepto del FGMOS. En el capítulo anterior se presentaron simulaciones en este sentido, con el objetivo de determinar la respuesta I-V del transistor a diferentes condiciones de polarización. La figura 5.4 muestra el diseño topológico del transistor NMOS con un aspecto geométrico W/L de $9\mu\text{m}/6\mu\text{m}$ ($30\lambda/20\lambda$) empleado en las simulaciones presentadas en el capítulo anterior. La capacitancia de compuerta, conocida normalmente como C_{ox} , forma parte del arreglo de capacitancias que considera al coeficiente de acoplamiento del FGMOS, además de las capacitancias parásitas que se forman en la estructura. La terminal de compuerta mostrada en esta figura, se conecta a través de una pista de aluminio a la placa inferior del capacitor formado por la membrana, a través del contacto óhmico en el pozo N.

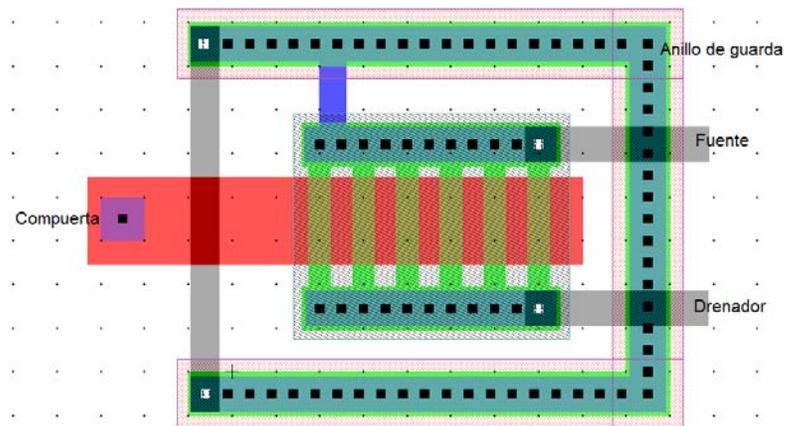


Figura 5. 4.- Transistor N para la lectura de la señal de salida.

La corriente proporcionada por el FGMOS es la que se correlaciona con el fenómeno físico a sensar, en este caso la presión. Una forma de procesar la señal es mediante la conversión de corriente a voltaje, para lo cual se requiere

configurar un convertidor con base a un amplificador operacional, para tener una lectura de voltaje, correspondiente a la corriente proporcional a la presión. Para acoplar al FGMOS con el convertidor de corriente a voltaje, sugiere emplear un espejo de corriente como el que se muestra en la figura 5.5. El FGMOS se conecta como carga activa del espejo de corriente y en función de la presión aplicada a la membrana, éste proporciona una corriente que será copiada por el espejo de corriente y enviada como entrada al amplificador operacional configurado como convertidor de corriente a voltaje, como el mostrado en la figura 5.6.

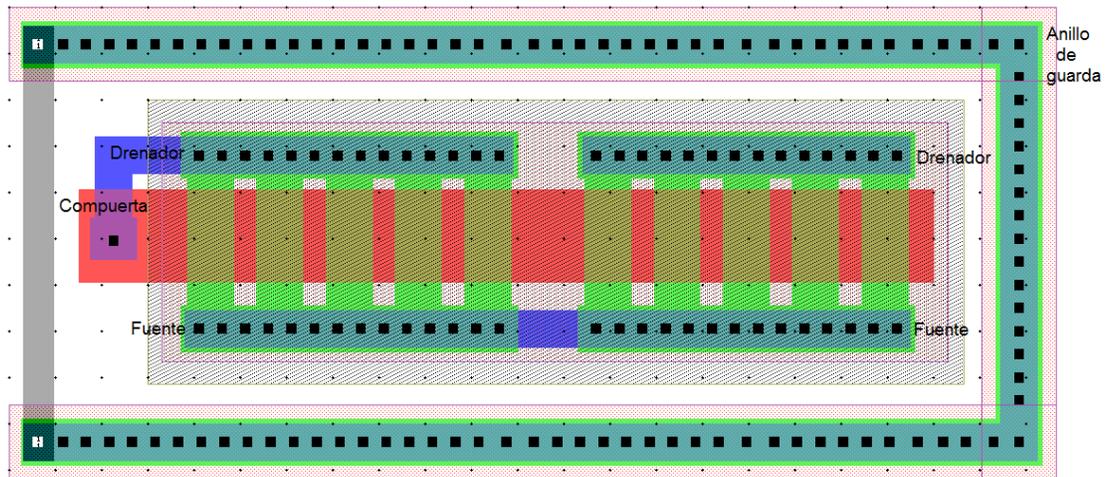


Figura 5. 5.- Espejo de corriente.

Como se mencionó en el capítulo anterior la salida del espejo de corriente es necesaria acoplarla a un amplificador operacional en configuración convertidor Corriente-Voltaje para tener voltaje a la salida como se muestra en la figura 5.6.

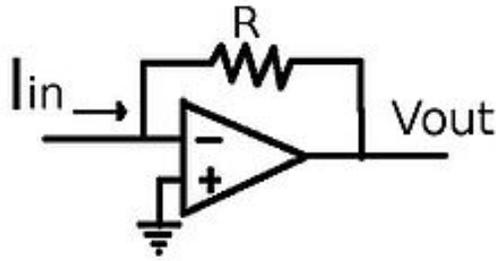


Figura 5. 6.- Amplificador operacional en configuración de convertidor corriente-voltaje.

De la figura anterior se observa que es necesario obtener el cálculo de la resistencia R, el cual se realiza a partir de la ecuación 5.1

$$V_{out} = -Ri_{in} \quad (5.1)$$

El voltaje máximo de salida para V_{out} se establece a un valor de 5V y la corriente de entrada i_{in} será la corriente máxima que entrega el espejo de corriente. Según las simulaciones presentadas en el capítulo anterior, esta corriente está en el orden de los 892 μ A. Con estos datos, el valor de la resistencia R es de aproximadamente 5.6K Ω .

En la figura 5.7 se presenta el diseño topológico del circuito del amplificador operacional en configuración convertidor de corriente a voltaje. Este diseño se obtuvo de las librerías que proporciona MOSIS al cual solo se agregó el diseño de la resistencia R calculada a partir de la ecuación 5.1. Esta resistencia se diseñó haciendo uso de la capa N Select ya que según las especificaciones tecnológicas de On Semiconductor, ésta entrega una resistencia de hoja más alta con un valor de 84.3 Ω /sq, lo cual permite reducir las dimensiones de la geometría requerida para el valor calculado [22].

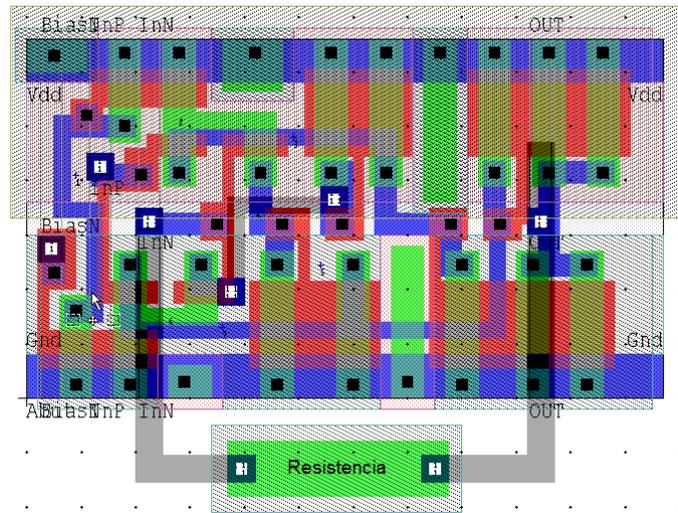


Figura 5. 7.- Diseño topológico del convertidor corriente-voltaje.

En la figura 5.8 se presenta el diseño topológico completo del sensor de presión incluyendo la electrónica del mismo.

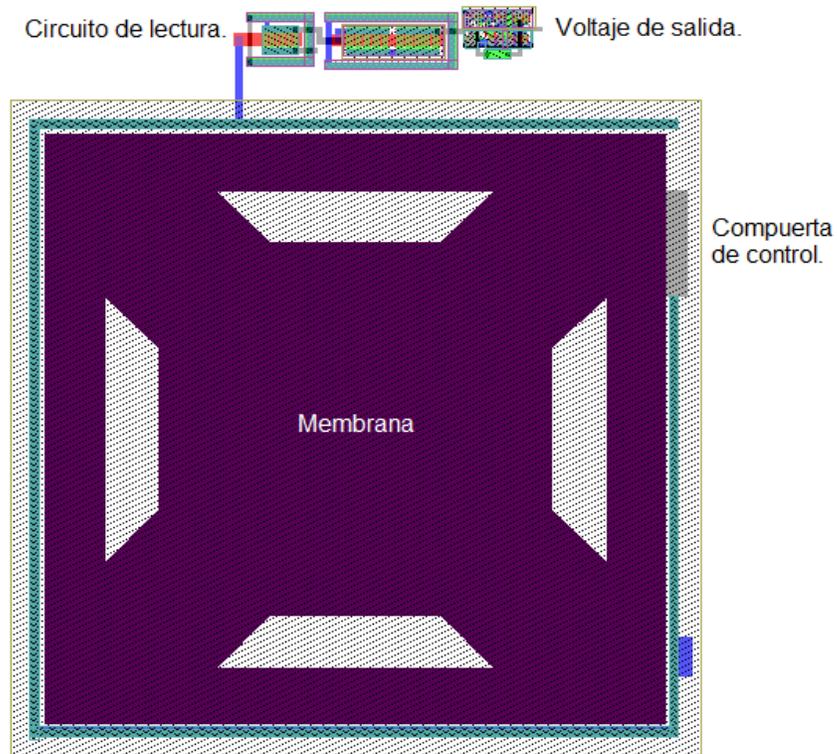


Figura 5. 8.- Diseño topológico completo.

Para fines de comparación de datos, es posible emplear una utilidad que incluye el software de diseño L-Edit, la cual sirve para extraer capacitancias entre las diferentes capas una vez que el diseño topológico se encuentra concluido. Esto se realizó utilizando la herramienta de extracción, para este caso se agregó la sección que indica las capas entre las que se desea conocer la capacitancia; tal archivo se muestra en el Apéndice C. La extracción solo permite conocer la capacitancia de la membrana en reposo, es decir, sin aplicar presión, a diferencia de COMSOL, en la cual se puede conocer la capacitancia de la membrana de manera dinámica. En el apéndice D se observa el archivo que genera esta herramienta. En la tabla 5.1 se muestra una comparación de los valores de capacitancia en reposo a partir de las tres herramientas empleadas para la obtención de la misma (COMSOL, L-Edit y analítica), de la cual se observa que los valores obtenidos son muy similares. Esto se realizó para la propuesta en que los brazos son de 40µm X 80µm.

Capacitancia Membrana COMSOL[F]	Capacitancia Membrana L-Edit [F]	Capacitancia Membrana Cálculo [F]	Capacitancia Con Brazos COMSOL [F]	Capacitancia Con Brazos L-Edit [F]	Capacitancia De Un Brazo COMSOL[F]	Capacitancia De Un Brazo L-Edit [F]
4.12107E-13	4.13213E-13	4.12107E-13	4.78216E-13	4.7882E-13	1.65273E-14	1.64023E-14

Tabla 5. 1.- Comparación de capacitancia en reposo.

A continuación se presentan los pasos más importantes que se realizan en el proceso de integración de la tecnología CMOS estándar para el caso del sensor de presión.

El primer paso es emplear una oblea de silicio con orientación (100) con un diámetro de 100 a 125 mm y un espesor de 500µm; posteriormente se difunde un pozo N en la oblea, como se muestra en la figura 5.9.



Figura 5. 9.- Pozo N en el sustrato.

A continuación se crecen sobre el sustrato las capas de óxido de silicio y el primer polisilicio (poly 1) como se observa en la figura 5.10; dentro de los MEMS, la capa de polisilicio puede ser usada como resistores, piezoresistores, electrodos y como capa estructural.

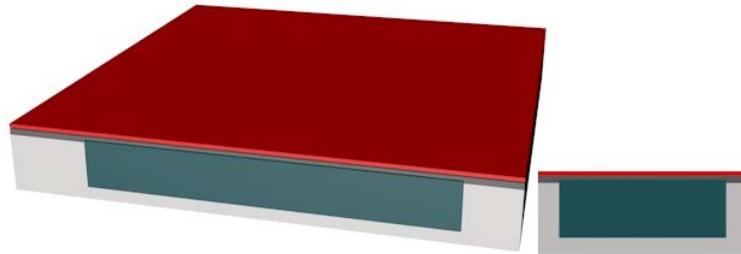


Figura 5. 10.- Crecimiento de la capa de Poly1.

En la figura 5.11 se observa el siguiente paso del proceso CMOS, el cual consiste en crecer una nueva capa de óxido de silicio y posteriormente colocar una mascarilla para definir el patrón que se desea para crecer las siguientes capas estructurales (poly2, metal 1 y metal 2).

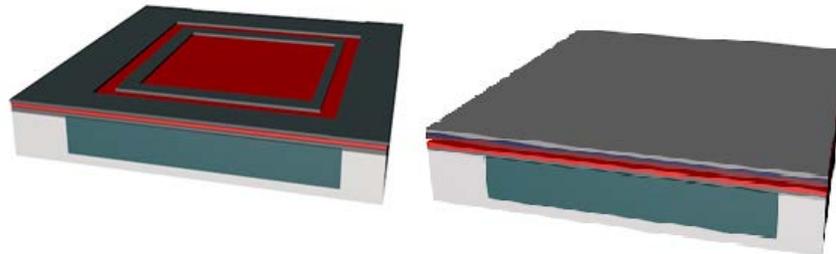


Figura 5. 11.- Crecimiento de óxido de silicio y del poly2 y definición de la capa estructural.

Posteriormente se remueven las capas quedando solo el patrón que se definió con la mascarilla; en la figura 5.12 se ilustra la secuencia del crecimiento de las tres capas estructurales.

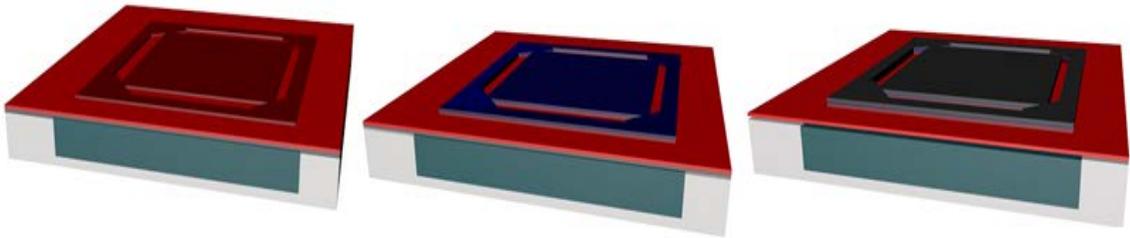


Figura 5. 12.- Crecimiento de las capas estructurales del sensor.

Por último, en la figura 5.13 se observa la mascarilla que contiene el marco que rodea la membrana del sensor para protegerla de los agentes decapantes que eliminan al poly 1 y el óxido de silicio crecido al inicio del proceso CMOS.

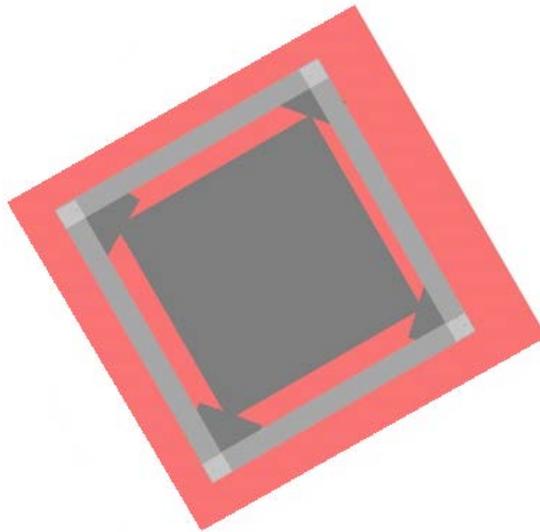


Figura 5. 13.- Mascarilla en el marco.

Finalmente, en la figura 5.14 se muestra la estructura final del sensor donde se pueden apreciar las tres capas estructurales así como los brazos que soportan a la membrana.

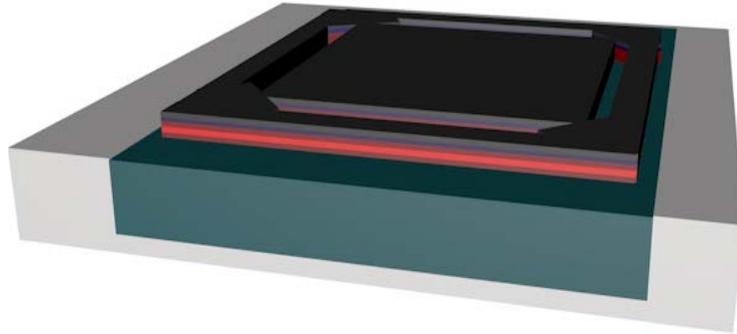


Figura 5. 14.- Estructura final.

5.4 Conclusiones.

En este capítulo se analizó el diseño topológico de la parte mecánica del sensor presión, así como la electrónica del mismo. Es importante recalcar que la tecnología CMOS-MEMS nos permite tener estas dos partes en un solo chip, lo que ayuda a reducir un post proceso de micromaquinado así como disminuir precios de fabricación del sensor.

Conclusiones.

- Con base a la tecnología CMOS estándar de 0.5 micras de longitud de canal, se presentó la metodología para el diseño de un sensor de presión. De igual manera se determinaron los factores y elementos que intervienen para establecer el rango de presión.
- Con la elaboración de este trabajo, se observaron las ventajas que presenta el transistor de compuerta flotante FGMOS como elemento de transducción, ya que reduce la circuitería adicional para la lectura de la señal de salida que entrega el sensor.
- Para el diseño del sensor se estableció una nueva estructura dentro del área de sensores de presión que no ha sido reportada en la literatura, la cual consta de cuatro brazos que soportan a la membrana.
- Se presentaron dos alternativas de la estructura del sensor, la primera de ellas fue una membrana anclada por sus cuatro lados. Esta alternativa maneja un buen rango de presión que va de 0-60000[Pa]. La segunda alternativa consiste en una membrana soportada por cuatro brazos anclados en uno de sus extremos, el uso de los brazos limita mucho al rango de presión en que operará el sensor que para este caso fue de 0-12000[Pa].
- Las dimensiones de los brazos que soportan a la membrana juegan un papel muy importante, debido a que cuando presentan dimensiones grandes el rango de presión se incrementa, de igual manera, la capacitancia se incrementa por el área que ocupan los brazos.

- Se mostró, mediante simulaciones, el principio de funcionamiento del FGMOS con la alternativa de operación mediante un coeficiente de acoplamiento variable logrado gracias a la capacitancia variable introducida al modelo del transistor MOS de compuerta flotante. Esta capacitancia corresponde a la parte mecánica de la membrana sensora.
- Se estableció un modelo en COMSOL para un sensor de presión, apoyado en el acoplamiento de los módulos mecánico y eléctrico, que sirve como punto de partida para la elaboración de estructuras con diferentes geometrías y condiciones de estímulos, con la finalidad de explorar diferentes rangos de presión.
- Se propone un diseño topológico para el sistema integrado de un sensor de presión, contemplando el post proceso de micromaquinado superficial que se tiene que realizar después de fabricado el chip, basado en la tecnología CMOS-MEMS.

6.1 Trabajo Futuro.

A partir de lo presentado en este trabajo se tienen los siguientes puntos que pueden seguir desarrollándose con la finalidad de obtener un diseño del sensor de presión completo.

- Desarrollar una expresión analítica que contemple el uso de los brazos en el diseño para los parámetros de desplazamiento y la capacitancia.
- Analizar más a detalle la respuesta del sensor para lograr que esta sea más lineal en el sistema.
- Buscar una solución para que el rango de presión no disminuya bruscamente al emplear brazos en la estructura y se asemeje al comportamiento obtenido en el primero modelo.
- Finalizar el modelo topológico para que el diseño se pueda enviar a fabricación mediante una tecnología CMOS estándar, con el objetivo de evaluar físicamente el comportamiento que presente.

Referencias.

1. Tai-Ran Hsu. MEMS & Microsystems, Design and Manufacture. New York: MacGraw-Hill, 2002.
2. Kaajakari, Ville. Practical MEMS. Las Vegas, Small Gear Publishing, 2009.
3. O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata (Eds.) (2005) Fabrication Technology. En Advanced Micro & Nanosystems Volume 2. Weinheim Alemania.
4. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Minhang Bao, Analysis and Design Principles of MEMS Devices, Shanghai, China, Elsevier, 2005.
5. Chan Liu, Foundations of MEMS, Second Edition, 2011.
6. Revista Mexicana de Física 47, Abril 2001, F-Sandoval Ibarra, El Silicio y sus propiedades como material sensor, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Guadalajara,
7. R. Jacob Baker, CMOS Circuit Design, Layout and Simulation, IEEE Series on Microelectronics Systems, Wiley, United State, 2010.
8. Microelectronics Journal 39, 2008. Ching-Liang Daia, Pin-Hsu Koa, Yao-Wei Taia, Chyan-Chyi Wub, Micro FET pressure sensor manufactured using CMOS-MEMS techniques, 2008.
9. Notas de curso, Silica An Avnet Division, Jordi Mayné, Sensores acondicionadores y procesadores de señal, 2003.
10. Notas de curso, Jorge López. Sensores de Presión, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Octubre 2005.
11. Journal Of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, No. 6, December 2005, Min-Xin Zhou, Qing-An Huang, Senior Member, IEEE, Ming Qin, and Wei Zhou, A Novel Capacitive Pressure Sensor Based on Sandwich Structures.
12. Revista Mexicana de Física 55, AL. Herrera May, B.S Soto Cruz, F. López Huerta and L.A Aguilera Cortés, Electromechanical analysis of a piezoresistive pressure microsensor for low-pressure biomedical applications, Febrero 2009.

13. Prime Faraday Partnership Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, An Introduction to MEMS, January 2002.
14. Amitabha Ghosh, Scaling, Mechanics Over Micro and Nano Scales, New York. Springer, 2011.
15. Physics of the Human Body, Dimensional analysis and scaling laws, Chapter 2, 2010.
- 16.7a. Conferencia de Ingeniería Eléctrica México, D.F. Septiembre 2001 Víctor M. Rincón, Alfredo Reyes B, José L. Domínguez y Eréndira García R., Modelo empleado en la simulación de un transistor MOS de compuerta flotante con compuerta de control múltiple, para PSPICE, septiembre 2001.
17. Revista Electrónica, Agustín Santiago Medina Vázquez, Retos sobre el modelado del transistor de compuerta flotante de múltiples entradas en circuitos integrados, México, Febrero 2013.
18. Segundo Congreso Nacional De Electrónica Septiembre 2002 Centro De Convenciones, William O. Jenkins Puebla, Pue. Mexico, Siordia-Vásquez, A. Díaz-Méndez y J.C. Sánchez-García, Metodología basada en Matlab para diseño de circuitos integrados con compuertas flotantes, INAOE.
19. Stephen D. Senturia, Microsystem Design, United States of America, 2002.
20. Tesis Guilio Fragiaco, A micromachined capacitive pressure sensor with signal conditioning electronics, 2008.
21. Tesis de Doctorado CINVESTAV M. en C. Víctor Hugo Ponce Ponce, Sensor Inteligente en Tecnologías CMOS, con Aplicaciones en Robótica, diciembre 2005.
22. Tesis de Doctorado CINVESTAV M. en C. Jesús Ezequiel Molinar Solís, Red Neuronal Celular Programable en Tecnología CMOS, abril 2006.
23. Reglas de diseño ON-Semiconductor. (www.onsemi.com/PowerSolutions/content.do?id=16693).
24. Notas de clase de J. Plusquellic. Asignatura: Principles of VLSI Design/VLSI Systems. Electrical & Computer Engineering. The University of New Mexico.

Apéndices.

Apéndice A: Modelo para la simulación del transistor FGMOS.

```

* OrCAD Model Editor - Version 9.0

*$
.subckt TMCf1_VH_NMOS_MEMBRANA_1 DN SN BN G1
*-----
*
*                               CINVESTAV
*          DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
*                               SEES
*    MODELO COMPLETO PARA TRANSISTOR DE COMPUERTA FLOTANTE CON
*          UNA COMPUERTAS DE CONTROL.
*          SOLO TRANSISTOR NMOS
*          MODELO DESARROLLADO POR VICTOR HUGO PONCE PONCE.
*          MODELO ADAPTADO PARA LA TECNOLOGIA DE 0.5 MICRAS DE ON SEMIC.
*          CORRIDA V09M
*-----
* DECLARACION DE PARAMETROS, BASADOS AL MODELO MEDIANTE EL SIMBOLO
* EN EL EDITOR ESQUEMATICO. C1 ES LA CAPACITANCIA ENTRE LA
MEMBRANA Y EL SUSTRATO.
+          PARAMS:    C1=0
+          LN=0       WN=0
+          ASN=0      PSN=0
+          ADN=0      PDN=0
*-----
* PARAMETROS EXTRAIDOS DEL PROCESO DE FABRICACION CMOS
* SE DEBEN MANTENER ACTUALIZADOS.
* POR EJEMPLO, EN PSPICE "CGBO" EQUIVALE A "CGBON" PARA UN NMOS.
* EN EL MODELO BSIM3 PARA TRANSISTORES DE CANAL CORTO (SUBMICRO)
* SE SUBSTITUYE LD POR LINT Y WD POR WINT. PHIN SE SUBSTITUYE
* POR PB.
*-----
* DESCRIPCION PARA EL TRANSISTOR NMOS.
.PARAM      CGBO=1.0E-9      CGSO=1.82E-10      CGDO=1.82E-10
.PARAM      WINT=1.965107E-7 LINT=8.377083E-8  PB=0.840291
.PARAM      TOX=1.41E-8
*
*          TOX: en metros
*-----
* EXPRESIONES DEL MODELO
*-----
*-----
.PARAM RGDE=1E12
.PARAM EPSI_AIRE=8.86E-12;PERMITIVIDAD DEL AIRE Y MEMBRANA
.PARAM EPSIO=34.51E-12;PERMITIVIDAD DEL SIO2
*          farads/metro

```

```

.PARAM DIST_POLY2_A_SUB=0.849978E-6; SEPARACION POLY2-SUBST.
*
*                                metros
*-----
* CAPACITANCIAS DE CONTROL DE ENTRADA
C1 G1 CF {C1}

*-----
* RESISTENCIAS ASOCIADAS A LAS COMPUERTAS DE CONTROL
RG1 G1 0 {RGDE}

*-----
* SUMA DE LAS CAPACITANCIAS DE CONTROL (Cin) EN ESTE CASO
* SOLO SE TIENEN UNA COMPUERTAS DE CONTROL (C1) ES PARA
* POLARIZAR AL TRANSISTOR.

VCT1 CT1 0 {C1}
RVCT1 CT1 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y CANAL, "COXN", NMOS

VCT2 CT2 0 {(EPSIO/TOX)*(LN-2*LINT)*(WN-2*WINT)}
RVCT2 CT2 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y SUSTRATO (NMOS)

VCT3 CT3 0 {CGBO*(LN-2*LINT)}
RVCT3 CT3 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y FUENTE Y DRENADOR, NMOS

VCT4 CT4 0 {(CGSO+CGDO)*(WN-2*WINT)}
RVCT4 CT4 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA TOTAL (TERMINO DEL DENOMINADOR PARA EL POTENCIAL DE
CF) EL CALCULO DE LAS CAPACITANCIAS SE HACE A TRAVES DE
* FUENTES DE VOLTAJE, SIENDO UN METODO EQUIVALENTE

ECTOT CTOT 0 VALUE={V(CT1)+V(CT2)+V(CT3)+V(CT4)}
RECTC CTOT 0 {RGDE}
*-----
* TERMINOS PARA EL POTENCIAL DE COMPUERTA FLOTANTE
*-----
* POTENCIAL DEBIDO A LA CAPACITANCIA DE CONTROL

ECIN CIN 0 VALUE={C1/V(CTOT)*V(G1)}
RECIN CIN 0 {RGDE}
*-----
* POTENCIAL DE CF EN FUNCION DE LOS POTENCIALES EN FUENTE,
* DRENADOR Y SUSTRATO DEL NMOS

```

```
EDSN DSN 0 VALUE={CGSO*(WN-2*WINT)/V(CTOT)*V(SN)+CGDO*(WN-
2*WINT)/V(CTOT)*V(DN)
+ +CGBO*(LN-2*LINT)/V(CTOT)*V(BN)}
*
```

```
REDSN DSN 0 {RGDE}
```

```
*-----
* POTENCIAL DE CF EN FUNCION DE LOS POTENCIALES EN EL CANAL
* Y SUSTRATO, NMOS
```

```
EOXBN OXBN 0 VALUE={((EPSIO/TOX)*(LN-2*LINT)*(WN-
2*WINT)*(V(SN)+2*PB))/V(CTOT)}
```

```
*
REOXBN OXBN 0 {RGDE}
```

```
*-----
* POTENCIAL TOTAL EN LA COMPUERTA FLOTANTE
```

```
ECF CF 0 VALUE={V(DSN)+V(OXBN)+V(CIN)}
RECF CF 0 {RGDE}
```

```
*-----
* MOSFET ASOCIADO AL MODELO
```

```
M1 DN CF SN BN MN1 L={LN} W={WN} AD={ADN} AS={ASN} PD={PDN}
PS={PSN} OFF
```

```
*-----
.ends TDCF1_VH_NMOS_MEMBRANA_1
```

```
*$
```

Apéndice B: Modelos para transistores NMOS y PMOS.

```

*                               MOSIS WAFER ELECTRICAL TESTS
*
*                               RUN: V09M
VENDOR: AMIS (ON-SEMI)
*                               TECHNOLOGY: SCN05                               FEATURE
SIZE: 0.5 microns
*                               Run type: SHR
*
*
* V09M SPICE BSIM3 VERSION 3.1 PARAMETERS
*
* SPICE 3f5 Level 8, Star-HSPICE Level 49, UTMOST Level 8
*
* DATE: Feb  4/11
* LOT: V09M                               WAF: 2103
* Temperature_parameters=Default

.MODEL MN1 NMOS (                               LEVEL = 7
+VERSION = 3.1                               TNOM = 27                               TOX =
1.41E-8
+XJ = 1.5E-7                               NCH = 1.7E17                               VTH0 =
0.6033055
+K1 = 0.9193622                               K2 = -0.1065538                               K3 =
20.591979
+K3B = -9.1011155                               W0 = 4.393248E-8                               NLX =
1.426577E-9
+DVT0W = 0                               DVT1W = 0                               DVT2W = 0
+DVT0 = 0.8628177                               DVT1 = 0.4045315                               DVT2 = -0.5
+U0 = 455.6568715                               UA = 1E-13                               UB =
1.383698E-18
+UC = 8.07605E-12                               VSAT = 1.97155E5                               A0 =
0.5976138
+AGS = 0.1289087                               B0 = 2.029789E-6                               B1 = 5E-6
+KETA = -2.756238E-3                               A1 = 2.328154E-4                               A2 = 0.3
+RDSW = 1.074553E3                               PRWG = 0.0988607                               PRWB =
7.238942E-3
+WR = 1                               WINT = 1.965107E-7                               LINT =
8.377083E-8
*+XL = 1E-7                               XW = 0                               DWG = -
8.437034E-9
+DWB = 3.078094E-8                               VOFF = -7.633973E-5                               NFACTOR =
1.1573034
+CIT = 0                               CDSC = 2.4E-4                               CDSCD = 0
+CDSCB = 0                               ETA0 = 3.231837E-3                               ETAB =
4.803812E-3

```

```

+DSUB      = 0.0537894      PCLM      = 2.1073222      PDIBLC1 =
4.117691E-4
+PDIBLC2 = 1.173409E-3      PDIBLCB = -0.2714521      DROUT    =
2.514784E-4
+PSCBE1   = 2.167284E10     PSCBE2   = 4.309903E-9     PVAG     = 0
+DELTA    = 0.01            RSH       = 84.3             MOBMOD   = 1
+PRT      = 0              UTE       = -1.5           KT1      = -0.11
+KT1L     = 0              KT2       = 0.022          UA1      =
4.31E-9
+UB1      = -7.61E-18      UC1       = -5.6E-11         AT       = 3.3E4
+WL       = 0              WLN       = 1              WW       = 0
+WWN      = 1              WWL       = 0              LL       = 0
+LLN      = 1              LW        = 0              LWN      = 1
+LWL      = 0              CAPMOD    = 2              XPART    = 0.5
+CGDO     = 1.82E-10       CGSO      = 1.82E-10         CGBO     = 1E-9
+CJ       = 4.175598E-4    PB        = 0.840291      MJ       =
0.4297322
+CJSW     = 3.483931E-10   PBSW      = 0.8              MJSW    =
0.2059566
+CJSWG    = 1.64E-10      PBSWG     = 0.8              MJSWG   =
0.2059566
+CF       = 0              PVTH0     = -0.0505758        PRDSW    =
281.2200286
+PK2      = -0.0697499     WKETA     = -6.123851E-3      LKETA    = -
2.318372E-3      )
*
*
.MODEL MP1 PMOS (                                LEVEL = 7
+VERSION = 3.1                                  TNOM   = 27           TOX     =
1.41E-8
+XJ      = 1.5E-7                                  NCH    = 1.7E17      VTH0    = -
0.9152268
+K1      = 0.553472                                K2     = 7.871921E-3  K3      =
8.3456329
+K3B     = 0.8137476                                W0     = 1E-8         NLX     =
1.661298E-7
+DVT0W   = 0                                      DVT1W  = 0           DVT2W   = 0
+DVT0    = 0.6826241                              DVT1   = 0.2907764   DVT2    = -0.3
+U0      = 201.3603195                            UA      = 2.408572E-9  UB      = 1E-21
+UC      = -1E-10                                 VSAT    = 1.043844E5  A0      =
0.8625012
+AGS     = 0.097008                                B0     = 5.131287E-7   B1      = 0
+KETA    = -4.865785E-3                          A1     = 4.099078E-4   A2      =
0.5220155
+RDSW    = 3E3                                    PRWG   = -0.0260778  PRWB    = -
0.0514886
+WR      = 1                                      WINT   = 2.224208E-7  LINT    =
1.277363E-7

```

```

+XL      = 1E-7          XW      = 0          DWG      =
1.017918E-11
+DWB     = -2.133914E-8 VOFF   = -0.0728335   NFACTOR =
1.0000003
+CIT     = 0           CDSC   = 2.4E-4       CDSCD   = 0
+CDSCB   = 0           ETA0   = 0           ETAB    = -
0.0178415
+DSUB    = 0.3875471   PCLM   = 2.4913442   PDIBLC1 =
0.0335017
+PDIBLC2 = 3.071184E-3 PDIBLCB = 0.0157585   DROUT   =
0.1973195
+PSCBE1  = 1E8        PSCBE2 = 3.383681E-9   PVAG    =
0.0150059
+DELTA   = 0.01       RSH    = 107.7       MOBMOD  = 1
+PRT     = 0          UTE    = -1.5       KT1     = -0.11
+KT1L    = 0          KT2    = 0.022      UA1     =
4.31E-9
+UB1     = -7.61E-18  UC1    = -5.6E-11   AT      = 3.3E4
+WL      = 0          WLN    = 1         WW      = 0
+WWN     = 1          WWL    = 0         LL      = 0
+LLN     = 1          LW     = 0         LWN    = 1
+LWL     = 0          CAPMOD = 2         XPART  = 0.5
+CGDO    = 2.35E-10  CGSO   = 2.35E-10   CGBO   = 1E-9
+CJ      = 7.137225E-4 PB      = 0.8741848   MJ      =
0.4883246
+CJSW    = 2.425711E-10 PBSW   = 0.8         MJSW   =
0.2079833
+CJSWG   = 6.4E-11   PBSWG  = 0.8         MJSWG  =
0.2079833
+CF      = 0          PVTH0  = 5.98016E-3   PRDSW  =
14.8598424
+PK2     = 3.73981E-3 WKETA  = 7.275123E-3   LKETA  =
0.0298866      )
*

```

Apéndice C: Archivo modificado para la extracción de capacitancias "mamis05.ext".

```

#           File: mAMIs05.ext
#           For: Extract definition file
#           Vendor: MOSIS/AMI
#           Technology: 0.50U (Lambda = 0.30um) / N-well
(SCN3M_SUBM)
# Technology Setup and Test/Demo Suite: in file mAMIs05.tdb
# Copyright (c) 1999
# Tanner Research, Inc. All rights reserved
#
# This file will work only with L-EDIT Version 7 and greater.
#
*****
*****

connect(n well wire, ndiff, ndiff)
connect(subs, pdiff, pdiff)
connect(allsubs, subs, subs)
connect(ndiff, Metall, Active Contact)
connect(pdiff, Metall, Active Contact)
connect(poly wire, Metall, Poly Contact)
connect(poly2 wire, Metall, Poly2 Contact)
connect(Metall, Metal2, Vial)
connect(Metal2, Metal3, Via2)
connect(LPNP emitter, pdiff, LPNP emitter)
connect(LPNP collector, pdiff, LPNP collector)
connect(Metall, Metal2, EXT_SHORT_M1M2)

# NMOS transistor with poly gate
device = MOSFET(
    RLAYER=ntran;
    Drain=ndiff, WIDTH;
    Gate=poly wire;
    Source=ndiff, WIDTH;
    Bulk=subs;
    MODEL=NMOS;
)

# PMOS transistor with poly gate
device = MOSFET(
    RLAYER=ptran;
    Drain=pdiff, WIDTH;
    Gate=poly wire;
    Source=pdiff, WIDTH;
    Bulk=n well wire;

```

```
MODEL=PMOS;
)
#
# PNP transistor
device = BJT(
    RLAYER=LPNP ID;
    Collector=LPNP collector;
    Base=n well wire ;
    Emitter=LPNP emitter;
    Substrate=allsubs;
    MODEL=PNP;
)
#
# NMOS capacitor
device = CAP(
    RLAYER=nmos capacitor;
    Plus=poly wire;
    Minus=ndiff;
    MODEL=;
)
# PMOS capacitor
device = CAP(
    RLAYER=pmos capacitor;
    Plus=poly wire;
    Minus=pdiff;
    MODEL=;
)
# Poly1-Poly2 capacitor
device = CAP(
    RLAYER=p2p1 capacitor, AREA;
    Plus=poly2 wire;
    Minus=poly wire;
    MODEL=;
)
# Poly2-Sustrato capacitor
device = CAP(
    RLAYER=p2sustrato capacitor, AREA;
    Plus=poly2 wire;
    Minus=sustrato wire;
    MODEL=;
)
# Poly resistor
device = RES(
    RLAYER=poly resistor;
    Plus=poly wire, WIDTH;
    Minus=poly wire, WIDTH;
    MODEL=;
```

```
)
# Poly2 resistor
device = RES(
    RLAYER=poly2 resistor;
    Plus=poly2 wire, WIDTH;
    Minus=poly2 wire, WIDTH;
    MODEL=;
)
# Hi-Res Poly2 resistor
device = RES(
    RLAYER=HiRes resistor;
    Plus=poly2 wire, WIDTH;
    Minus=poly2 wire, WIDTH;
    MODEL=;
)

# N Diffusion resistor
device = RES(
    RLAYER=ndiff resistor;
    Plus=ndiff, WIDTH;
    Minus=ndiff, WIDTH;
    MODEL=;
)
# P Diffusion resistor
device = RES(
    RLAYER=pdiff resistor;
    Plus=pdiff, WIDTH;
    Minus=pdiff, WIDTH;
    MODEL=;
)
# N Well resistor
device = RES(
    RLAYER=nwell resistor;
    Plus=n well wire, WIDTH;
    Minus=n well wire, WIDTH;
    MODEL=;
)
# Bonding Area Capacitance
device = CAP(
    RLAYER=Pad Comment;
    Plus=Metall1;
    Minus=allsubs;
    MODEL=;
)

# Diodes PDIFF
device = DIODE(
    RLAYER=diode pdiff;
    Plus=pdiff, WIDTH;
```

```
        Minus=n well wire, WIDTH;
        MODEL=Dpdiff;
    )IGNORE_SHORTS

# Diodes NDIFF
device = DIODE(
    RLAYER=diode ndiff;
    Plus=subs, WIDTH;
    Minus=ndiff, WIDTH;
    MODEL=Dndiff;
)IGNORE_SHORTS

# Lateral Diode
device = DIODE(
    RLAYER=diode_lat;
    Plus=pdiff, WIDTH;
    Minus=ndiff, WIDTH;
    MODEL=D_lateral;
)IGNORE_SHORTS
```

Apéndice D: Extracción de capacitancias.

```
* Circuit Extracted by Tanner Research's L-Edit Version 13.00 /
Extract Version 13.00 ;
* TDB File: E:\Layout3.tdb
* Cell: 40x80 Version 1.01
* Extract Definition File: C:\Documents and
Settings\Jeovani\Escritorio\MOSIS\AMI_050\TechSetups\mamis05.ext
* Extract Date and Time: 06/19/2013 - 18:53

.include morbn20.md

* Warning: Layers with Unassigned FRINGE Capacitance.
* <p2p1 capacitor>
* <p2sustrato capacitor>
* <nmos capacitor>
* <pmos capacitor>

C1 2 1 C=16.677239f $ (240 -224 507 -90)

* Total Nodes: 2
* Total Elements: 1
* Total Number of Shorted Elements not written to the SPICE file:
0
* Output Generation Elapsed Time: 0.000 sec
* Total Extract Elapsed Time: 0.480 sec
.END
```

Apéndice E: Netlist para el circuito de lectura.

```
* Archivo Circ_lectura_b.cir
* Espejo de corriente con FGMOS
M1 2 2 1 1 MP1 L=6u W=15u
M2 5 2 1 1 MP1 L=6u W=15u
*
* D S B G CF
X1 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=4.78216E-13 LN=6u WN=9u
X2 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=5.01044E-13 LN=6u WN=9u
X3 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=5.26817E-13 LN=6u WN=9u
X4 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=5.56393E-13 LN=6u WN=9u
X5 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=5.90644E-13 LN=6u WN=9u
X6 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=6.30916E-13 LN=6u WN=9u
X7 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=6.79215E-13 LN=6u WN=9u
X8 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=7.38723E-13 LN=6u WN=9u
X9 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=8.14904E-13 LN=6u WN=9u
X10 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=9.18310E-13 LN=6u WN=9u
X11 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=1.07355E-12 LN=6u WN=9u
X12 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=1.36421E-12 LN=6u WN=9u
X13 2 4 4 3 6 TCMCF1_JTF_NMOS_AIRE PARAMS: C1=3.34078E-12 LN=6u WN=9u
*
VDD 1 0 DC 5
VSS 4 0 DC 0
VCG 3 0 DC 3
Vdrain2 5 0 DC 2.5
.LIB v09m-params.LIB
.LIB FGMOS_N_JTF_1_05_aire.LIB
.DC Vdrain2 0 5 .01
.PROBE
.END
```